ГОССТРОЙ СССР

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ БЕТОНА И ЖЕЛЕЗОБЕТОНА (НИИЖБ)

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ (ЦНИИСК)

Кандидаты технических наук М. Я. КРИВИЦКИЙ, Н. И. ЛЕВИН, В. В. МАКАРИЧЕВ

ЯЧЕИСТЫЕ БЕТОНЫ

(технология, свойства и конструкции)



ИЗДАТЕЛЬСТВО ЛИТЕРАТУРЫ ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ

Москва — 1972

УДК 691.327 : 666.973

В книге описан отечественный и зарубежный опыт применения в строительстве автоклавных ячеистых бетонов, производство которых быстро увеличивается за последние 10—20 лет во многих странах. Изложены технологические основы и некоторые практические данные производства изделий из ячеистых бетонов. Приведены важнейшие физико-механические свойства ячеистых бетонов, необходимые для проектирования конструкций из них. Описываются конструкции, применяемые в отечественной практике и за рубежом, дается сравнительный анализ и изложены перспективы их применения.

Книга предназначена для инженерно-технических работников предприятий по производству изделий и конструкций из ячеистых бетонов, строительных, проектных и научно-исследовательских организаций. Табл. 34, рис. 64, библ. 93 назв.

3—2—8
138—1972

НИИЖБ, ЦНИИСК

Кривицкий Михаил Яковлевич,
Левин Наум Исаакович,
Макаричев Виктор Валерианович

Ячеистые бетоны
(технология, свойства и конструкции)

* * *

Стройиздат
Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 9

* * *

Редактор издательства Р. Л. Черкинская
Внешнее оформление художника В. А. Семина
Технический редактор В. М. Родионова
Корректор Г. Г. Морозовская

Слано в набор 3/II-1972 г. Подписано к печати 28/IV-1972 г. Т-08526
Формат 84×108[1]/[32] д. л. — 2,125 бум. л. 7,14 усл. печ. л. (уч.-изд. 7,59 л.)
Тираж 6500 экз. Изд № А. VI—1439 Зак. № 150 Цена 38 коп.

Владимирская типография Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР
Гор. Владимир, ул. Победы, д. 18-б.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В Директивах XXIV съезда КПСС по плану развития народного хозяйства СССР на 1971—1975 гг. предусматривается дальнейший значительный рост капитального строительства жилых и производственных зданий в городе и на селе. Это ставит перед строителями задачу использования и внедрения в строительство новых эффективных материалов и конструкций. При этом требуется существенное снижение веса конструкций, трудоемкости их изготовления и монтажа и в конечном счете снижение стоимости строительства. Особенно важно выполнение этих требований при применении бетонных и железобетонных конструкций, которые являются основой современного массового строительства.

Одним из эффективных видов бетона, применение которого отвечает перечисленным выше требованиям снижения веса и стоимости конструкций, является автоклавный ячеистый бетон. Этот вид бетона имеет малый объемный вес и относительно высокую прочность, что позволяет применять его в легких эффективных ограждающих конструкциях. Для изготовления ячеистых бетонов имеются разнообразные сырьевые ресурсы. Поэтому за последние 10—20 лет производство и применение ячеистых бетонов быстро возрастало во многих странах (особенно в европейских). В СССР производится около 4 млн. $м^3$ ячеистого бетона в год, что превышает производство в любой другой стране. Планируется дальнейшее увеличение его производства.

Настоящая книга написана с целью ознакомления широких кругов строителей с имеющимся опытом производства и применения ячеистых бетонов в отечественной и зарубежной практике, а также с результатами экспериментальных и теоретических исследований и разработок, выполненных в НИИЖБ, ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко и в ряде других институтов.

Глава I написана канд. техн. наук М. Я. Кривицким, глава II — канд. техн. наук Н. И. Левиным, глава III — канд. техн. наук В. В. Макаричевым.

Авторы выражают благодарность рецензентам книги кандидатам технических наук Г. Я. Амханицкому и И. Л. Жодзишскому за полезные советы, которые помогли им в работе над книгой.

ВВЕДЕНИЕ

Ячеистый бетон представляет собой искусственный камень с равномерно распределенными порами в виде сферических ячеек, диаметр которых обычно составляет 1—3 *мм*. Этот вид бетона изготовляется из вяжущего, тонкодисперсного кремнеземистого компонента, порообразователя и воды.

Тепловлажностная обработка ячеистых бетонов осуществляется обычно в автоклавах в воздушно-паровой среде с высокой влажностью при давлении пара в пределах 8—12 *ат* (изб.). (Безавтоклавные ячеистые бетоны в данной книге не рассматриваются.)

Пористая структура ячеистых бетонов образуется путем введения в суспензию затворенных материалов газообразующих добавок (чаще всего алюминиевой пудры) или пены, приготовленной с помощью различных пенообразователей.

В качестве вяжущего для производства ячеистых бетонов применяют цементы, известь и смесь извести с цементом (смешанное вяжущее), в качестве кремнеземистых компонентов — пески, золы (угольные и сланцевые). Наличие этих дешевых местных материалов в больших количествах в различных районах страны обеспечивает возможность организации широкого (почти повсеместного) производства ячеистых бетонов.

Бетоны, в которых используются газообразователь, вода, цемент и песок, цемент и зола, шлак и песок, называют (соответственно): газобетон, газозолобетон и газошлакобетон. Аналогичные бетоны, в которых используется известь (с добавкой цемента или без нее), песок, зола и шлак, называют соответственно: газосиликат, газозолосиликат и газошлакосиликат. Имеется еще и газошлакозолобетон, состоящий из шлака, золы и песка. Особое название — газокукермит — присвоено разновидности газозолобетона, в которой роль вяжущих выполняет сланцевая зола. Этот бетон с успехом применяется в Эстонской ССР.

Разновидности ячеистых бетонов, в которых пористая структура создается с помощью пенообразователей, носят названия: пенобетон, пенозолобетон, пеносиликат, пеношлакобетон и т. д.

Если примерно 15 лет назад подавляющее большинство отечественных цехов и заводов ячеистого бетона выпускало различные пенобетоны, то теперь они составляют только примерно 15% общего производства ячеистых бетонов. Остальное составляют различные газобетоны, что обусловлено рядом их преимуществ, выявившихся при массовом изготовлении изделий, особенно крупноразмерных. Поверхности изделий из газобетона не имеют отслоений («корочек»), которые часто получаются на поверхностях изделий из пенобетонов. Для затворения газобетонных смесей можно применять более горячую воду, не боясь их осадки. Применение горячей воды ускоряет процесс газовыделения и обеспечивает температуру газобетонной смеси порядка 60° С к моменту окончания вспучивания. В результате смесь схватывается быстрее и время выдержки газобетонных изделий перед автоклавной обработкой может быть сокращено с 10 (при пенобетонных изделиях) до 3—4 *ч*. При повышенной температуре изделий, поступающих на автоклавную обработку, уменьшаются деструктивные явления.

В дальнейшем доля пенобетонных изделий в общем объеме производства будет еще меньше, так как все новые заводы проектируются и строятся только в расчете на выпуск газобетонных изделий.

Следует подчеркнуть, что на строительство заводов ячеистого бетона требуются меньшие капитальные вложения, чем на строительство заводов, производящих изделия и конструкции из различных легких бетонов (бетонов на легких пористых заполнителях). Для ячеистых бетонов не требуется организации специального производства легких заполнителей, ни крупных, ни мелких (типа, например, керамзитового или перлитового песка).

В процессе автоклавной обработки кремнеземистые компоненты — молотые пески, золы — вступают в химическое взаимодействие с основными вяжущими (цементом и известью) и приобретают частично свойства вяжущих веществ, благодаря чему обеспечивается повышенная относительная прочность ячеистого бетона. Так, современные наиболее распространенные отечественные ячеистые бетоны имеют при объемном весе

700 *кг/м³* (в сухом состоянии) контрольную прочность 50 *кгс/см²* (на сжатие в кубах размером 10×10×10 *см* в высушенном состоянии). Указанную прочность при таком объемном весе не имеют другие бетоны, включая легкие типа керамзитобетона и перлитобетона. Таким образом, ячеистые бетоны являются наиболее эффективными бетонами для различных ограждающих конструкций.

На основе опыта передовых отечественных заводов ячеистого бетона и большинства зарубежных заводов вполне можно достичь при объемном весе 600 и 500 *кг/м³* контрольную прочность (соответственно) 40 и 30 *кгс/см²*.

Сочетание таких прочностных показателей и объемного веса позволило создать ряд эффективных отечественных конструкций из ячеистого бетона, совмещающих в себе функции теплоизоляционных и несущих элементов. Это панели наружных стен полосовой разрезки с размером 1,2×6 *м* для промышленных и жилых зданий и панели высотой на этаж (около 3 *м*), длиной на один или два архитектурно-планировочных модуля (на одно или два окна) для жилых зданий; ребристые и плоские плиты с размером 1,5×6 *м* для покрытий промышленных зданий и крупноразмерные плиты для чердачных и бесчердачных покрытий жилых зданий.

Стены из ячеистобетонных панелей на 20—40% легче и дешевле других крупнопанельных стен из легкобетонных или трехслойных панелей. Еще более эффективны панели из ячеистых бетонов в покрытиях жилых зданий, особенно в бесчердачных.

Сопоставление отечественных конструкций из ячеистых бетонов с зарубежными показывает, что отечественные конструкции более индустриальны. Большинство применяемых за рубежом конструкций имеет значительно меньшие размеры.

Благодаря эффективным свойствам ячеистых бетонов намечается значительный рост их производства и применения в строительстве.

Глава I

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ

1. ОБРАЗОВАНИЕ ПОР В ГАЗОБЕТОННЫХ СМЕСЯХ И ИХ УСТОЙЧИВОСТЬ

К числу важных вопросов технологии ячеистого бетона относится получение устойчивых смесей с определенной пористостью в зависимости от заданного объемного веса.

Рассмотрим, как протекает процесс вспучивания раствора при введении в его состав алюминиевой пудры и какие факторы влияют на устойчивость вспученной газобетонной смеси. При смешивании раствора с алюминиевой пудрой в результате взаимодействия алюминия с гидратом окиси кальция выделяется водород. Известно, что растворимость водорода в воде незначительна. В 1 *л* воды при температуре 20° С растворяется 18,19 *см³* водорода, раствор быстро пересыщается и в результате частички алюминиевой пудры становятся центрами образования пузырьков. Эти мельчайшие пузырьки водорода при дальнейшем газовыделении увеличиваются в размере. Таким образом, вспучивание смеси следует рассматривать как процесс возникновения и роста газообразных сфероидальных ячеек, рассредоточенных по всему объему раствора.

На газообразующую способность смеси влияет ряд факторов. Основные из них — начальная вязкость, текучесть смеси, ее температура, скорость образования структуры с определенными механическими свойствами, дисперсность алюминиевой пудры и ее количество, химический состав среды.

Объемный вес газобетона зависит от несущей способности смеси, которая определяется ее структурно-механическими свойствами. Если после окончания

вспучивания смесь не будет обладать определенной несущей способностью, произойдет ее осадка. В случае, если смесь затвердеет до того, как завершился процесс газообразования, не будет достигнут заданный объемный вес газобетона.

Известны различные методы определения структурно-механических свойств дисперсных систем. Газобетонную смесь можно отнести к пластично-вязким системам; ее структурно-механические свойства целесообразно оценивать, используя метод конического пластометра, предложенный акад. П. А. Ребиндером [66]. Этот метод позволяет определять степень нарастания пластической прочности газобетонной смеси в процессе вспучивания, а также прочность структуры после того, как процесс закончился и, следовательно, устанавливать несущую способность вспученной газобетонной смеси. Пластическая прочность характеризуется сопротивлением, которое смесь оказывает прониканию конуса (пластометра) при постоянной нагрузке.

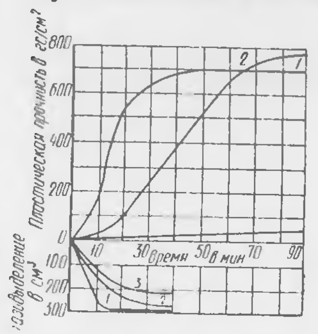


Рис. 1. Изменение пластической прочности газобетонных смесей и газовыделения

1 — газобетон на извести-кипелке и песке; 2 — то же, на известково-цементном вяжущем; 3 — то же, на цементе

Результаты измерения пластической прочности газобетонных смесей объемным весом 700 *кг/м*³ и газовыделения с течением времени приведены на рис. 1.

Наиболее интенсивное газовыделение и нарастание пластической прочности наблюдается в смесях, состоящих из извести, а также известково-цементного вяжущего. Через 90 *мин* после затворения пластическая прочность этих смесей составляет соответственно 700 и 750 *гс/см*². За это время пластическая прочность газобетонной смеси на цементе не превышает 50 *гс/см*².

Высокая пластическая прочность газобетонной смеси и ее интенсивное нарастание благоприятно сказываются на устойчивости смеси и сроках выдержки отформованных изделий до автоклавной обработки.

Помимо установления параметров текучести и температуры смеси для получения заданного объемного веса необходимо также определить ее несущую способность с учетом высоты формы, в которой формуется изделие.

Если из вспученной смеси вырезать призму высотой H, то слой газобетонной смеси у основания призмы будет испытывать давление

$$P = \gamma_{см} H, \qquad (1)$$

где P — давление у основания призмы в *гс/см*²; $\gamma_{см}$ — объемный вес газобетонной смеси в *г/см*³; H — высота призмы в *см*.

Чтобы не произошло разрушения структуры (осадки) газобетонной смеси у основания призмы, пластическая прочность τ должна отвечать следующему условию:

$$\tau \geqslant a\gamma_{см} H, \qquad (2)$$

где a — коэффициент, учитывающий давление от образовавшейся при вспучивании «горбушки» и допустимые отклонения в объемном весе газобетона в пределах до +5%.

Для определения пластической прочности используется пластометр П. А. Ребиндера.

Схема пластометра приведена на рис. 2. Рычаг с конусом пластометра устанавливают в строго горизонтальное положение, перемещая подвижные грузы в правой части рычага, до тех пор, пока указательная стрелка не совместится с нулевым давлением шкалы отсчета. После этого стакан, заполненный газобетонной смесью и помещенный в теплоизолирующий сосуд, ставят на подъемный столик и, медленно вращая, устанавливают его таким образом, чтобы «зеркало» газобетонной смеси коснулось вершины конуса. Для измерения температуры в исследуемую газобетонную смесь погружают термобаллон манометрического термометра, который установлен на пластометре. На подвешенную справа от конуса тарель в определенной последовательности ставят гирьки весов с таким расчетом, чтобы обеспечить плавное погружение конуса на глубину 15 *мм*. Глубину погружения конуса определяют индикатором часового типа с ценой деления 0,01 *мм*. При принятых в приборе соотношениях плеч (10 : 1) между конусом и индикатором погружение конуса определяют с точностью до 0,1 *мм*.

Величину пластической прочности определяют по формуле

$$\tau = \frac{k_1 P}{2h^2}. \qquad (3)$$

где P — вес гирь в $г$; h — глубина погружения конуса в $см$; k_1 — коэффициент, зависящий от угла раствора конуса (при $\alpha = 60°$ $k_1 = 0{,}956$).

Определять величину пластической прочности для каждого состава необходимо три раза и по полученным данным вычислять средние значения.

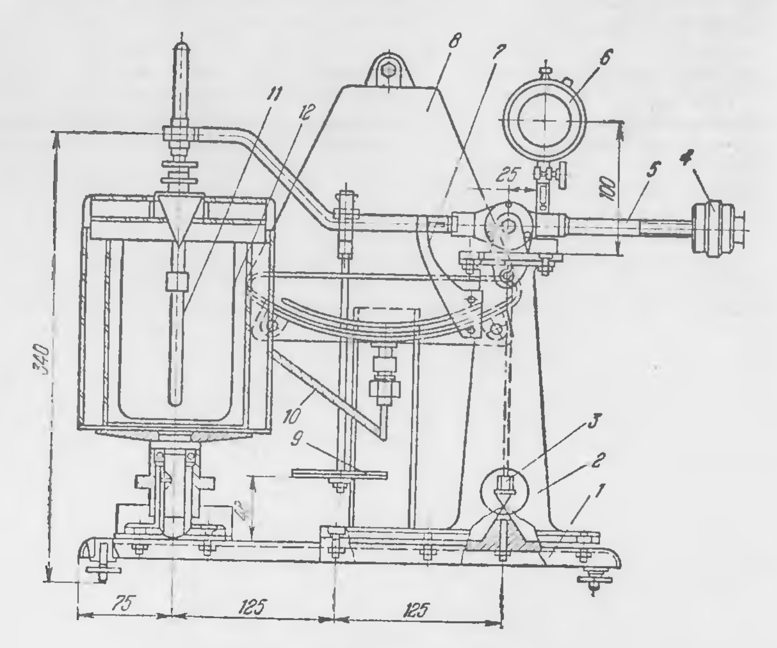


Рис. 2. Пластометр

1 — станина; 2 — стойка; 3 — отвес; 4 — подвижный груз; 5 — балансирующий рычаг; 6 — индикатор часового типа с ценой деления 0,01 $мм$; 7 — указательная шкала; 8 — термометр манометрический; 9 — тарель для установки гирь; 10 — соединительный гибкий шланг; 11 — термобаллон манометрического термометра; 12 — стеклянный стакан для газобетонной смеси

Если значение пластической прочности, устанавливаемое пластометром, ниже требуемого, то вводят ускорители схватывания, повышают температуру воды затворения, изменяют текучесть или используют другие возможные способы и, таким образом, подбирают необходимые параметры для получения газобетонной смеси, обладающей нужной несущей способностью.

При вспучивании газобетонной смеси иногда наблюдается явление, напоминающее «кипение»; крупные пузырьки водорода поднимаются к поверхности вначале в отдельных местах, затем скапливаются по всей площади, и смесь начинает «кипеть». Это приводит к разрушению образовавшейся ячеистой структуры и полной или частичной осадке вспученной смеси. В заводских условиях кипение чаще всего наблюдается при применении некоторых цементов, характеризующихся длительными сроками схватывания.

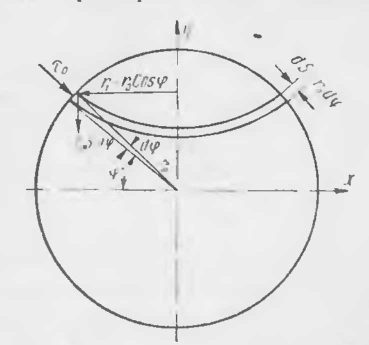


Рис 3 Распределение усилий при всплывании пузырька водорода

При малых значениях вязкости и пластической прочности смеси в процессе вспучивания газовые пузырьки вначале сливаются, а затем, достигнув определенной величины, всплывают и вызывают кипение. Эти явления сравнительно мало изучены и требуют специальных исследований.

Можно доказать, что всплывание пузырька водорода зависит не только от его размера, но и от пластической прочности смеси. Для этого определим подъемную силу пузырька и сопротивление среды при его всплывании.

Величину подъемной силы пузырька определяют по формуле

$$P = \frac{4}{3} \pi r^3 \gamma_{см} \alpha, \qquad (4)$$

где P — подъемная сила; r — радиус пузырька; $\gamma_{см}$ — объемный вес газобетонной смеси, α — переходной коэффициент от объемного веса идеальной жидкости к газобетонной смеси.

Всплыванию пузырька будет препятствовать сопротивление среды, характеризуемое величиной пластической прочности газобетонной смеси.

Для вычисления силы F необходимо суммировать действие элементарных сил сопротивления по половине шаровой поверхности пузырьков (рис. 3), т. е.

$$F = \int_0^{\pi/2} \tau \cos\varphi \sin\varphi \, 2\pi r^2 \, d\varphi = \pi r^2 \tau. \qquad (5)$$

Чтобы создать условие, при котором пузырек не бу-

дет всплывать, величина подъемной силы должна быть уравновешена силой сопротивления среды, т. е.

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \gamma_{см}\alpha \leqslant \pi r^2 \tau. \qquad (6)$$

Из последнего выражения следует, что для предотвращения всплывания пузырьков водорода нужно повысить пластическую прочность газобетонной смеси.

По данным П. Р. Таубе, одним из факторов, препятствующих слиянию пузырьков, а следовательно, увеличению их размеров, является создание упругих пленок на поверхности воздушных пузырьков путем введения в раствор поверхностно-активных веществ.

2. ПРОЧНОСТЬ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ АВТОКЛАВНОГО ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ ВЯЖУЩИХ

В отечественной и зарубежной литературе приводятся различные данные по прочностным показателям ячеистых бетонов одного и того же объемного веса. Это можно объяснить тем, что исследования проводились с применением неодинакового сырья при разном соотношении вяжущего и кремнеземистого компонента и различных условиях автоклавной обработки образцов. Кроме того, отсутствуют данные о методике испытаний образцов.

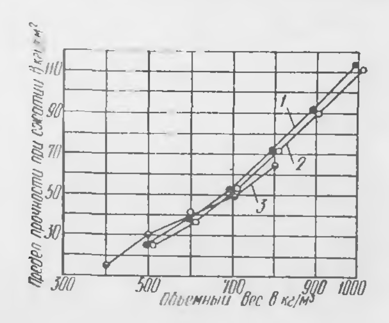


Рис. 4. Прочность газобетона в зависимости от объемного веса

1 — на известково-цементном вяжущем (данные НИИЖБ); *2* — на цементе (данные НИИЖБ); *3* — то же (по каталогу фирмы «Сипорекс»)

На рис. 4 представлены усредненные показатели прочности газобетона в зависимости от его объемного веса. Эти данные относятся к газобетонным образцам размером 10×10×10 *см*, испытанным после автоклавной обработки при давлении 8 *ат* (изб.) и высушенным до постоянного веса в сушильном шкафу при температуре 105° С. Образцы изготовляли с применением портландцемента Белгородского завода, который относится к алитовым цементам, и молотой извести-кипелки Гжельского завода с 85%-ным содержанием CaO. Песок, содержавший до 95% кремнезема, был размолот до удельной поверхности 2500 *см²/г*.

Для сравнения на рис. 4 приведены показатели прочности газобетона, взятые из каталога шведской фирмы «Сипорекс». Прочность газобетона на цементе и известково-цементном вяжущем практически одинакова.

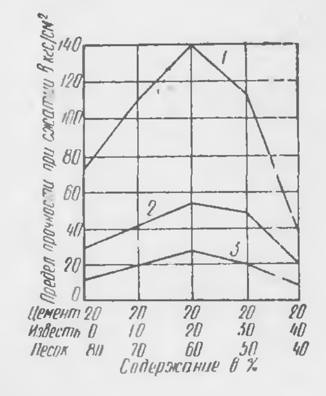


Рис. 5. Прочность газобетона различного объемного веса на известково-цементном вяжущем в зависимости от соотношения вяжущего и песка

1 — объемный вес 900 *кг/м³*; *2* — то же, 700 *кг/м³*; *3* — то же, 500 *кг/м³*

При оптимальных технологических параметрах прочностные показатели газобетона, изготовленного в НИИЖБ и в других институтах, не отличались от показателей шведских ячеистых бетонов. Такие же данные по прочности (с небольшими отклонениями) были получены на ряде газобетонных заводов: Ворошиловградском, Ленинградском, Новосибирском и др.

В НИИЖБ проводили также исследования по установлению зависимости между прочностью газобетона разного объемного веса и расходом известково-цементного вяжущего. Аналогичная работа была проведена для газобетона на портландцементе [54].

При исследовании газобетона на известково-цементном вяжущем количество извести и песка изменяли в широких пределах. Анализ результатов определения прочности при сжатии (рис. 5) показал, что состав, содержащий 20% молотой извести-кипелки, 20% портландцемента и 60% молотого песка, является оптимальным. В этом случае прочностные показатели газобетона объемного веса 500, 700 и 900 *кг/м³* соответственно равны 30, 55, 140 *кгс/см²*.

С увеличением количества молотой извести-кипелки и уменьшением содержания песка прочность газобетона снижается. Резкое снижение прочности (до 70%) наблю-

далось при составе: 20% портландцемента, 40% молотой извести-кипелки и 40% песка.

Было также установлено, что прочность газобетона разного объемного веса на портландцементе меняется в зависимости от содержания тонкомолотого песка (рис. 6). При составах без добавки песка, т. е. на чистом портландцементе, была получена наименьшая прочность. Замена части цемента песком увеличивает прочность. Максимума она достигает при соотношении цемента с песком 1 : 0,6, т. е. при 60% вяжущего и 40% песка. При объемном весе

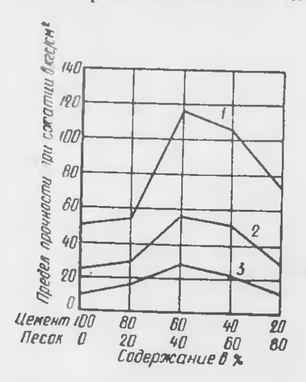


Рис. 6. Прочность газобетона на цементе в зависимости от соотношения цемента и песка

1, 2, 3 — то же, что на рис. 5

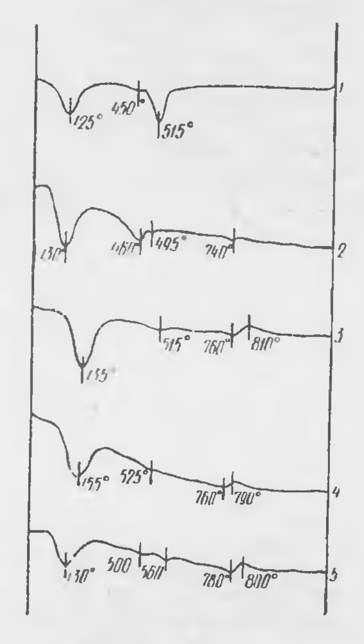


Рис. 7. Кривые ДТА газобетона на цементе в зависимости от соотношения цемента и песка соответственно

1 — 100 и 0%; 2 — 80 и 20%; 3 — 60 и 40%; 4 — 40 и 60%; 5 — 20 и 80%

500, 700 и 900 *кг/м*³ прочность газобетона составляет соответственно 28, 56 и 116 *кгс/см*². Дальнейшее увеличение содержания песка и уменьшение количества вяжущего снижают прочностные показатели. Так, прочность газобетона состава 20% вяжущего и 80% кремнеземистой добавки на 60% ниже максимальной.

В исследованиях определяли также изменение прочности конструктивного газобетона объемного веса 1000 и 1200 *кг/м*³ при различном соотношении вяжущего и

кремнеземистого компонента (табл. 1). Наименьшая прочность газобетона наблюдалась как на составах с малым расходом вяжущего, так и на тех составах, в которых расход вяжущего превышал оптимальный.

Таким образом, максимальная прочность газобетона достигается только при определенных соотношениях вяжущего и кремнеземистого компонента.

Прочность газобетона объемного веса 1000 и 1200 *кг/м*³ на смешанном вяжущем состава 20% цемента, 20% молотой извести-кипелки и 60% песка (1 : 1 : 3) была равна соответственно 215 и 340 *кгс/см*². Такие же прочностные показатели газобетона можно получить на составе: 60% цемента и 40% песка (1 : 0,6). Однако если при смешанном вяжущем расход цемента и молотой извести-кипелки, например, для газобетона объемного веса 700 *кг/м*³ составляет соответственно 115 и 115 *кг* на 1 *м*³, то при использовании одного портландцемента для получения аналогичной прочности требуется увеличить расход его до 315 *кг* на 1 *м*³. Учитывая, что свойства газобетона на смешанном вяжущем мало отличаются от свойств газобетона на портландцементе, совершенно очевидно, что для изготовления автоклавных ячеистых бетонов применение портландцемента как основного вяжущего экономически неоправданно.

Наряду с изучением прочностных характеристик определяли новообразования, возникающие в результате автоклавной обработки газобетона при различном соотношении вяжущего и кремнеземистого компонента.

Для установления зависимости фазового состава газобетона объемного веса 700 *кг/м*³ на портландцементе при различном соотношении вяжущего и молотого песка были взяты соответствующие пробы, подвергнутые дифференциальному термическому и рентгеноструктурному анализам. Одновременно был проведен химический анализ для определения свободной извести (табл. 2).

Результаты исследований показали, что фазовый состав автоклавного газобетона меняется в зависимости от содержания вяжущего и кремнеземистой добавки (рис. 7 и 8).

Кривая ДТА образца газобетона, изготовленного на одном портландцементе без добавки песка, характеризуется тремя эндотермическими эффектами. Эндотермический эффект при 125—130° С связан с удалением адсорбционной и гигроскопической влаги из продуктов гидра-

тации. Впадина на термограмме при температуре 450—465° С и линии на рентгенограмме 3,25; 1,91; 1,78; 1,68 Å характеризуют присутствие в образце двухосновного гидросиликата кальция $C_2SH(A)$. Значительный эндотермический эффект при 515° С, а также линии на рентгенограмме 4,88; 3,1 и 2,66Å свидетельствуют о наличии в исследуемом образце $Ca(OH)_2$. По данным химического анализа, количество свободной извести в этом образце составляет 9,67%.

Таблица 1

Прочность конструктивного газобетона при различном соотношении вяжущего и кремнеземистого компонента

Состав в %			Объемный вес в кг/м³	$R_{сж}$ в высушенном состоянии, приведенный к расчетному объемному весу, в кгс/см²
цемент	известь	песок		
20	10	70	1000	158
20	20	60	1000	215
20	20	50	1000	208
20	40	40	1000	155
20	10	70	1200	325
20	20	60	1200	340
20	30	50	1200	310
20	40	40	1200	180

Таблица 2

Содержание свободной извести в автоклавном газобетоне разного состава

Состав по весу в %			Свободная CaO в %
цемент	молотая известь-кипелка	молотый песок	
100	—	—	9,67
80	—	20	1,91
60	—	40	1,2
40	—	60	1,06
20	—	80	0,71
20	10	70	1,14
20	20	60	1,86
20	30	50	2,83
20	40	40	4,52

Термограмма образца газобетона, состоящего из 80% портландцемента и 20% песка, показала изменение фазового состава продуктов гидратации. Эндотермический эффект при 460° С несколько увеличивается — повысилось количество двухосновного гидросиликата кальция $C_2SH(A)$, по-видимому, вследствие взаимодействия извести, образовавшейся при гидратации цемента с песком. Линии на рентгенограмме (рис. 8) 3,52; 3,25; 2,4; 1,91 и 1,77Å свидетельствуют о наличии в исследуемом образце $C_2SH(A)$.

При 495° С эндотермический эффект резко уменьшается, что связано с уменьшением количества окиси кальция. Это подтверждается также данными химического анализа. Количество свободной извести по сравнению

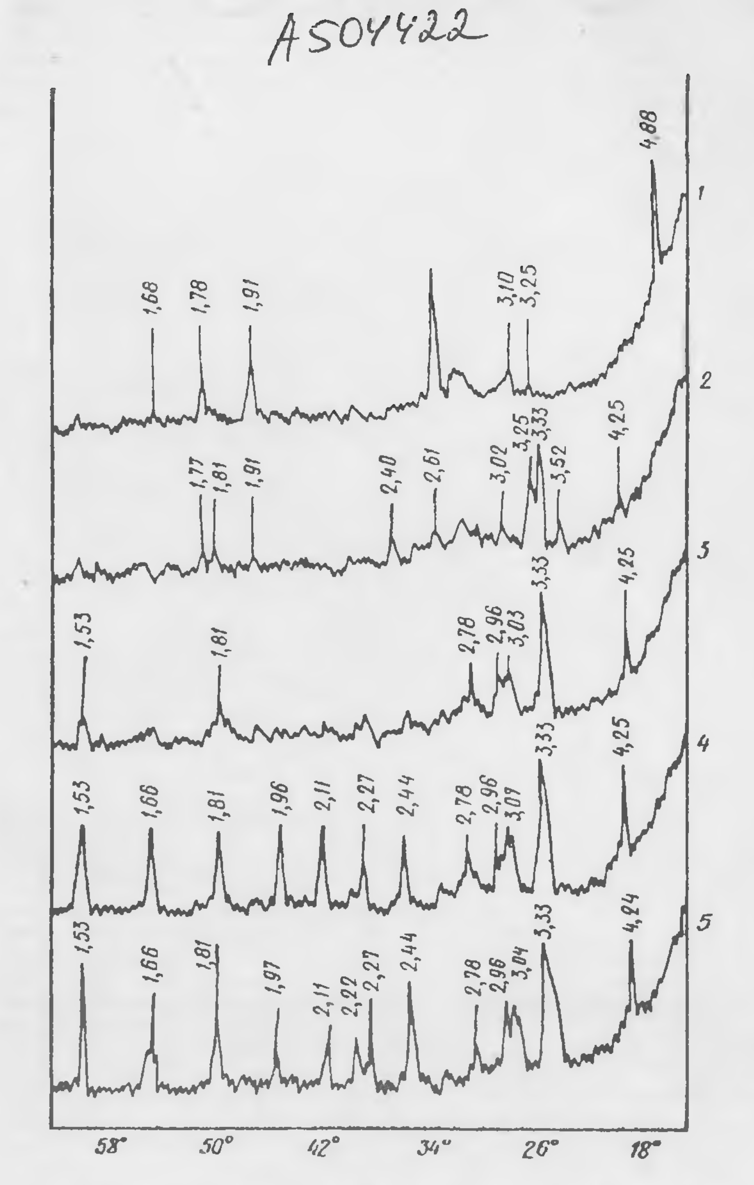


Рис. 8. Рентгенограммы газобетона на цементе в зависимости от соотношения цемента и песка

1, 2, 3, 4, 5 — то же, что на рис. 7

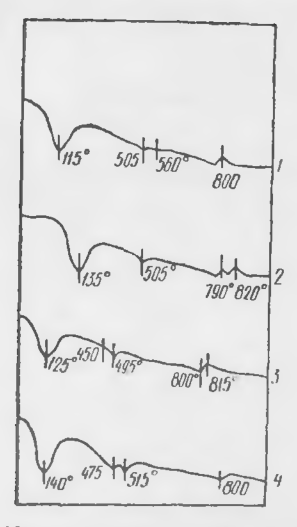


Рис. 9. Кривые ДТА газобетона на известково-цементном вяжущем в зависимости от соотношения цемента, извести и песка соответственно

1 — 20, 10 и 70%; *2* — 20, 20 и 60%; *3* — 20, 30 и 50%; *4* — 20, 40 и 40%

с содержанием ее в предыдущем образце снизилось с 9,67 до 1,91%. На термограмме исследуемого образца отмечается небольшой эндотермический эффект при температуре 740° С, обусловленный, вероятно, разложением $CaCO_3$.

Существенно изменяется фазовый состав образца газобетона, состоящего из 60% портландцемента и 40% песка. Как уже было указано, газобетон на этом составе имел наибольшую прочность. На кривой ДТА (см. рис. 7) эндотермический эффект при 450° С полностью исчезает, что говорит об отсутствии в данном случае $C_2SH(A)$. Еле заметный эффект при 515° С свидетельствует о значительном уменьшении количества $Ca(OH)_2$. Содержание свободной извести составляет 1,2%. Одновременно при 810° С на термограмме появляется новый экзотермический эффект.

При добавке 40% песка происходит почти полное связывание $Ca(OH)_2$ и образование вместо двухосновного гидросиликата $C_2SH(A)$ низкоосновного гидросиликата $CSH(B)$. Последний обнаруживается на рентгенограмме — линии 3,02; 2,78 и 1,81 Å.

При увеличении добавки кремнезема до 60% существенных изменений на кривой ДТА и рентгенограмме по сравнению с образцом, состоящим из 60% цемента и 40% песка, не наблюдается. Химическим анализом обнаружено снижение содержания свободной извести до 1,06%. Прочность образцов по сравнению с образцами, содержащими 40% молотого песка, снизилась незначительно.

Фазовый состав газобетона на смешанном вяжущем при различных соотношениях вяжущего и кремнеземистого компонента меняется следующим образом.

Кривая ДТА газобетона, содержащего 20% цемента, 10% молотой извести-кипелки и 70% молотого песка, характеризуется незначительными эндотермическими эффектами при 505 и 560° С (рис. 9). Первый эффект объясняется дегидратацией $Ca(OH)_2$, второй — модификационными превращениями кварца. Экзотермический эффект при температуре 800° С вызван присутствием одноосновного гидросиликата кальция $CSH(B)$. Это подтверждается также наличием на рентгенограмме линий 3,02 и 1,81 Å (рис. 10).

Термограмма образца газобетона, в составе которого содержится до 20% извести, показывает увеличение эндотермического эффекта при 505° С за счет дегидратации $Ca(OH)_2$. Количество свободной извести возрастает незначительно и составляет 1,86%.

Экзотермический эффект на кривой ДТА при 820° С и линии 3,02 и 1,81 Å свидетельствуют о наличии одноосновного гидросиликата кальция $CSH(B)$. На рентгенограмме обнаруживается присутствие $C_2SH(A)$ — линии 4,25; 2,40 и 1,92 Å и $CSH(B)$ — линии 3,01 и 1,80 Å.

Прочность газобетона, содержащего 30% извести, снижается при всех значениях объемного веса. При увеличении количества извести до 40% на термограмме становятся более выраженными эндотермические эффекты при 475 и 515° С — повышается содержание $C_2SH(A)$ и $Ca(OH)_2$.

Наличие $C_2SH(A)$ подтверждается на рентгенограмме линиями 3,52; 3,25; 2,51; 2,46 и 1,77 Å. Отсутствует экзотермический эффект одноосновного гидросиликата кальция. Эндотермический эффект при 800° С связан с разложением $CaCO_3$. Количество свободной извести, по данным химического анализа, достигает 4,52%.

Снижение прочности газобетона при введении 40% извести, как видно из рис. 6, достигает 70% по сравнению с составом, содержащим 20% молотой извести-кипелки.

Газобетоны оптимальных составов характеризуются высокими показателями морозостойкости. Газобетон на смешанном вяжущем по морозостойкости практически не уступает газобетону на цементе. Опыты, проведенные с газобетоном объемного веса 700 *кг/м*³, как на портландцементе, так и на смешанном вяжущем, показали,

что после 100 циклов замораживания снижение прочности не превышает 20%. После 150 циклов попеременного

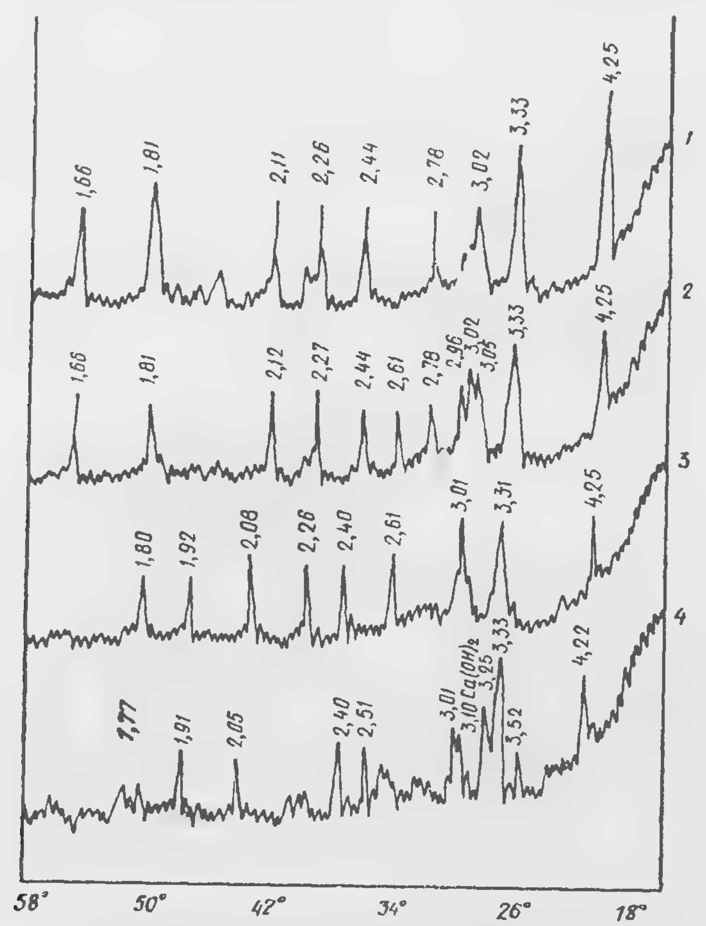


Рис. 10. Рентгенограммы газобетона на известково-цементном вяжущем в зависимости от соотношения вяжущего и песка

1, 2, 3, 4 — то же, что на рис. 9

замораживания и оттаивания снижение прочности достигает 30%, а после 200—50%.

Исследуя влияние расхода цемента на стойкость ячеистого бетона при карбонизации, А. Т. Баранов и К. П. Бахтияров [6], Е. С. Силаенков и Г. В. Тихомиров

[72] установили, что прочность изменяется в зависимости от расхода вяжущего. При малом содержании цемента в бетоне в период карбонизации прочность значительно снижается. С увеличением расхода вяжущего снижение прочности становится меньшим. Авторы рекомендуют для повышения долговечности расход цемента для ячеистого бетона объемного веса 700 *кг/м*³ доводить до 350 *кг/м*³. Это соответствует составу, содержащему примерно 55% портландцемента и 45% молотого песка.

Таким образом, как по прочности, так и по долговечности оптимальным будет являться такой состав газобетона, при котором отношение цемента к молотому песку приближается к 1 : 1.

В Московском инженерно-строительном институте им. В. В. Куйбышева под руководством д-ра техн. наук проф. А. В. Волженского проводятся обширные исследовательские работы по использованию металлургических шлаков для получения различных видов бетонов автоклавного твердения [20]. Установлено, что прочность газобетона на шлакозольных цементах в значительной степени зависит от тонкости их помола и состава. При увеличении удельной поверхности шлакового вяжущего с 3500 до 6500 *см²/г* прочность возрастает на 50—60%. Наибольшая прочность достигается только при определенном соотношении между шлаковым вяжущим и тонкомолотым кремнеземистым компонентом (песком, золой или их смесью). В зависимости от свойств сырьевых материалов состав колеблется от 1 : 0,5 до 1 : 1,2.

В НИИЖБ на протяжении ряда лет [69] проводятся исследования технологии и свойств газошлакобетона с использованием различных шлаков. Наилучшие результаты достигаются при использовании гранулированных шлаков, основных и нейтральных, с модулем активности не менее 0,2. Прочность газошлакобетона объемного веса 700—800 *кг/м*³ составляет 70—80 *кгс/см*², а объемного веса 1000—1200 *кг/м*³ — до 300 *кгс/см*². Состав смеси в %: гранулированный шлак 40—60; зола или молотый песок 30—40; известь-кипелка 5—8 и двуводный гипс 5. При исследовании фазового состава газошлакобетона было установлено, что высокая прочность его наблюдается при содержании 30—40% тоберморита, в котором SiO_2 частично замещен Al_2O_3. Изучая различные составы газошлакобетона, авторы пришли к выводу, что увеличение количества одноосновных гидросиликатов и гидро-

гранатов свыше 40% приводит к снижению прочности, увеличению усадочных деформаций и трещиностойкости бетона.

В Институте строительства и строительных материалов Госстроя Эстонской ССР Ф. П. Кивисельг и Э. Г. Оямаа [60] разработали технологию и изучили свойства разновидности ячеистого бетона — газокукермита. Этот вид ячеистого бетона изготавливается на основе циклонной золы, получаемой при пылевидном сжигании горючего сланца-кукермита, и кварцевого песка. Циклонная зола является полиминеральным вяжущим и содержит около 20% клинкерных минералов — в основном β-C_2S и около 20% свободной CaO, а также стекловидную фазу. Установлено, что на оптимальном составе при соотношении циклонной золы и песка в пределах 1 : 0,7; 1 : 1 прочность газокукермита при объемном весе 700—800 *кг/м³* составляет 45—60 *кгс/см²*, а при объемном весе 1000—1200 *кг/м³* — 105—175 *кгс/см²*.

Авторы отмечают, что в результате автоклавной обработки происходит взаимодействие между клинкерными минералами и свободной известью, с одной стороны, и кремнеземом золы и песка, с другой. При оптимальном составе образуются гидросиликаты, в основном типа CSH(B).

Обширные исследовательские работы по комплексному использованию зол ТЭЦ для производства строительных материалов, а также для автоклавных ячеистых бетонов были проведены И. А. Ивановым [32].

А. Т. Барановым, Б. А. Новиковым и Ю. Б. Кузнецовым в НИИЖБ проводились исследования газозолосиликата, в результате которых установлено большое влияние активности известково-зольной смеси на его прочность. Как при уменьшении, так и при увеличении активности смеси против оптимальных значений прочность, а также другие физико-технические свойства газозолосиликата снижаются. Этот вид ячеистого бетона внедрен на Ступинском заводе Главмособлстройматериалов. При использовании золы-уноса Ступинской ТЭЦ, которая имеет следующий состав в %: SiO_2 39—52; Al_2O_3 17—26; Fe_2O_3 19—28; CaO 1,6—6,7; MgO 0,7—2,3 и п.п.п. 1,1—3,6, лучшие показатели по прочности были получены при активности известково-зольной смеси 18% с добавкой 4% гипса. На оптимальных составах прочность газозолосиликата следующая: при объемном весе 500—600 *кг/м³* 20—30 *кгс/см²*, а при объемном весе 700—800 *кг/м³* 55—85 *кгс/см²* [57, 58]. Исследования, проведенные во ВНИИСтроме С. А. Кржеминским и Б. Б. Крыжановским [36] по технологии газосиликата, показали, что при использовании сырья хорошего качества и выдерживания определенных технологических параметров можно получить ячеистый бетон, обладающий высокими показателями. Известь рекомендуется размалывать до удельной поверхности 6000—7000 *см²/г*. Сроки ее гашения должны находиться в пределах 15—25 *мин*. Расход извести устанавливается с таким расчетом, чтобы содержание активной окиси кальция в смеси составляло 18—20% по весу. Для изготовления газосиликатных изделий рекомендуется применять кварцевые пески.

По данным Ю. М. Бутта, А. А. Майера, Н. С. Мануйловой [15], при взаимодействии калиевого или натриевого полевого шпата с известью в результате автоклавной обработки образуются главным образом гидросиликаты типа $C_2SH(A)$. Такой фазовый состав приводит к пониженным прочностным показателям. В молотом полевошпатовом песке наряду с полевошпатовыми минералами находится кварц; известь реагирует с ним, образуя гидросиликаты кальция, основность которых зависит от содержания извести в исходной смеси, дисперсности песка и длительности автоклавной обработки.

А. В. Волженский [18, 19] отмечает, что прочность автоклавных бетонов зависит не только от состава гидросиликатов, но и от толщины цементирующей пленки между зернами кварца. Чем тоньше пленка цементирующей связки, тем прочнее бетон при прочих равных условиях. На толщину пленки влияют главным образом состав смеси, водовяжущее отношение (считая и кремнеземистый компонент) и дисперсность вяжущего.

3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ

Материалы и требования к ним

Для изготовления ячеистого бетона необходимы следующие основные материалы: вяжущее, кремнеземистый компонент, газообразователь или пенообразователь, добавка гипса и вода.

В качестве вяжущего применяют следующие материалы: портландцементы, молотую известь-кипелку, известь-кипелку с добавкой портландцемента (смешанное вяжущее), молотые доменные шлаки с активизаторами в виде молотой извести-кипелки и гипса (известково-шлаковый цемент) и нефелиновый цемент.

Применение портландцемента в качестве одного основного вяжущего для изготовления автоклавных ячеистых бетонов, как уже отмечалось ранее, экономически неоправданно. Тем не менее отдельные отечественные заводы и некоторые зарубежные фирмы применяют портландцемент, что связано с определенными местными условиями. При использовании портландцемента в производстве крупноразмерных изделий предпочтение следует отдавать алитовым и малоалюминатным цементам с содержанием в клинкере трехкальциевого алюмината не более 6%. Начало схватывания цемента — от 1 до 2 *ч* и конец схватывания — не позднее 4 *ч*. Удельная поверхность цемента, определяемая на приборе ПСХ-2, должна быть в пределах 2500—3000 *см²/г* для конструктивного и конструктивно-теплоизоляционного и 3000—4000 *см²/г* для теплоизоляционного ячеистого бетона. В остальном цемент должен удовлетворять требованиям ГОСТ 10178—62.

Использование в качестве основного вяжущего для производства различных видов автоклавных изделий известково-шлакового и нефелинового цементов позволяет без применения портландцемента получать газобетон высокого качества. Это стало возможным в результате целого ряда исследовательских работ, проведенных П. И. Боженовым, А. В. Волженским, А. Е. Саталкиным и др. [12, 20, 74].

Из известково-шлаковых цементов рекомендуется применять в первую очередь те, которые приготовлены на гранулированных шлаках (основных, нейтральных и кислых). Могут быть также применены известково-шлаковые цементы, приготовленные на отвальных шлаках при условии, что величина их модуля основности составляет не менее 0,6 и величина модуля активности не менее 0,4. Начало схватывания известково-шлакового цемента должно быть не позднее 2 *ч*; его удельная поверхность — не менее 4000 *см²/г* (по прибору ПСХ-2); количество активной CaO — не менее 10% (по весу).

Нефелиновый цемент должен иметь удельную поверхность 3000—3500 *см²/г* и следующие сроки схватывания: начало — не ранее 30 *мин* и не позднее 1,5 *ч*, конец — не позднее чем через 6 *ч* [13]. Суммарное содержание щелочей (K_2O+Na_2O) в нефелиновом цементе не должно превышать 2%. Цемент должен обладать равномерностью изменения объема. Рекомендуются следующие составы нефелинового цемента (в %):

1-й состав		2-й состав	
Нефелиновый шлам	85—90	Нефелиновый шлам	80
Известь . . .	10—15	Портландцементный клинкер . . .	20
Гипсовый камень .	5	Гипсовый камень .	5 (от веса вяжущего)

Молотая известь-кипелка должна удовлетворять требованиям ГОСТ 9179—70 «Известь строительная». При изготовлении крупных изделий предусматривается применение молотой извести-кипелки не ниже второго сорта, содержащей не более 3% окиси магния. Содержание в извести активных CaO и MgO должно быть не менее 70%, количество «пережога» — не более 2%; скорость гашения должна составлять от 5 до 25 *мин*.

Известь-кипелку измельчают в двухкамерных шаровых мельницах до получения очень тонкого порошка. Для предупреждения при помоле комкования частичек извести целесообразен совместный ее помол с немолотым сухим песком при соотношении 1 : 0,2 (известь: песок). При изготовлении крупных изделий тонкость помола извести должна быть такой, чтобы при полном прохождении через сито 02 остаток на сите 009 был не более 15%. При определении прибором ПСХ-2 (Товарова) удельная поверхность молотой извести-кипелки должна составлять не менее 3500—4000 *см²/г*. Степень измельчения зависит от количества материала, подаваемого для размола в мельницу, и продолжительности помола. Для получения материала с постоянной тонкостью помола необходимо обеспечить нормальный режим работы мельницы, подобрать вес и размер мелющих тел, догружая их по мере износа через каждые 10—15 дней.

Наиболее распространенным кремнеземистым компонентом при изготовлении автоклавных ячеистых бетонов является песок. От качества песка в значительной степени зависит получение крупных изделий без трещин. Ис-

ходя из этого целесообразнее всего применять чистые кварцевые пески, содержащие не менее 90% кремнезема. Можно использовать пески, в том числе и барханные, с меньшим содержанием кремнезема, если изделия, полученные из этих песков, будут надлежащего качества, без трещин.

Следует учитывать, что примеси, встречающиеся в песке, также существенно влияют на качество ячеистого бетона. Особо отрицательное влияние оказывают илистые примеси и глины. Их содержание не должно превышать более 3%. Если глинистые частицы содержат минералы типа монтмориллонита, то их количество не должно превышать 1%. В остальном песок должен удовлетворять требованиям ГОСТ 8736—67.

Песок перед употреблением подвергают помолу. Размалывают песок по мокрому способу. При этом отпадает необходимость сушить песок в специальных сушильных барабанах и значительно улучшаются санитарно-гигиенические условия в помольном отделении. По удельной поверхности (на приборе Товарова) тонкость помола песка должна быть в пределах 2500—3000 $см^2/г$. При помоле песка в мельницу подается вода до получения шлама объемного веса 2000—2500 $кг/м^3$.

Количество песка и воды, содержащихся в шламе, в зависимости от объемного веса определяют по формулам:

$$П = 1{,}606Ш(\gamma_{шл} - 1); \tag{7}$$

$$В = Ш\gamma_{шл} - П, \tag{8}$$

где $П$ — количество песка в *кг*; $Ш$ — количество шлама в *л*; $\gamma_{шл}$ — объемный вес шлама в *кг/л*; $В$ — количество воды, содержащейся в шламе, в *л*.

П. Р. Таубе для ускорения процесса помола и получения шлама с пластичными свойствами рекомендует вводить ПАВ.

Взамен молотого песка в качестве кремнеземистого компонента можно применять золу-унос. Зола-унос от сжигания бурых и каменных углей должна содержать стекловидных и оплавленных частиц не менее 50%, потери при прокаливании для бурых углей не выше 3% и для каменных — не более 5%, удельная поверхность золы, определенная на ПСХ-2, должна быть в пределах 3000—5000 $см^2/г$, набухание в воде не выше 5% [58]. Золу-унос обычно применяют непосредственно от элек-

Таблица 3

Характеристика алюминиевой пудры

Марка	Остаток в % при просеивании через сито			Количество активного Al в %
	0075 (5100 *отв/см²*)	0053 (10085 *отв/см²*)	0012 (15 000 *отв/см²*)	
ПАК-1	4	—	—	90
ПАК-2	1,5	—	—	87
ПАК-3	1	1	1	82
ПАК-4	Без остатка	0,3	0,5	82

трофильтров ТЭЦ (по опыту Ступинского завода ячеистого бетона). Зола-унос в отвалах не однородна по составу и загрязнена различными примесями, поэтому в ячеистых бетонах она применяется очень редко.

Чтобы окончательно установить пригодность вяжущего и кремнеземистого компонента для производства ячеистых бетонов, в каждом отдельном случае необходимо изготовить опытную партию изделий. В качестве газообразователя применяют алюминиевую пудру. В СССР выпускают алюминиевую пудру четырех марок (ГОСТ 5494—50). Характеристика пудры различных марок приведена в табл. 3. Для производства газобетона целесообразнее всего применять пудру марки ПАК-3 или ПАК-2. Алюминиевую пудру необходимо предварительно обработать для удаления жировой пленки (парафина), которой она покрывается в процессе изготовления на заводах. Парафинированные частицы алюминиевой пудры имеют гидрофобные, не смачиваемые водой поверхности. При перемешивании с раствором такую пудру не удается равномерно распределить по всей смеси, что ухудшает структуру газобетона. Кроме того, пленка парафина замедляет процесс выделения водорода. В связи с этим для удаления пленки алюминиевую пудру предварительно прокаливают в электрических печах при температуре 200—250° С в течение 4 *ч*. Для предотвращения взрыва при воспламенении эту работу проводят в специально отведенных помещениях.

В НИИЖБ Л. М. Розенфельдом [68], а на ленинградском Автовском ДСК Е. Г. Григорьевым была доказана возможность использования непрокаленной пудры путем придания ей гидрофильных свойств (смачиваемости) предварительной обработкой в водном растворе поверхностно-активного вещества малой концентрации. Это предложение было с успехом реализовано на газобетонных заводах в Ленинграде, Нижнем Тагиле, Новосибирске и др. Для приготовления гидрофильной водноалюминиевой суспензии в сосуд емкостью 15 *л* засыпают необходимое количество алюминиевой пудры из расчета на один замес, затем заливают поверхностно-активное вещество ГК, ССБ, канифольное масло и др. в количестве 5% (из расчета на сухое вещество) от веса алюминиевой пудры и 10 *л* воды. После тщательного перемешивания в течение 2 *мин* гидрофильная водно-алюминиевая суспензия считается готовой; ее можно приготовить для работы на одну-две смены.

На зарубежных заводах ячеистого бетона широко применяют газообразователь на основе алюминиевой пудры в виде пасты. Это улучшает санитарно-гигиенические условия в смесительном отделении.

Двуводный гипс, добавляемый для замедления гашения извести-кипелки, должен иметь тонкость помола, характеризуемую остатком на сите 02 не более 3%, и удовлетворять требованиям ГОСТ 4013—61 «Камень гипсовый для производства вяжущих веществ». Допускается применение полуводного гипса (ГОСТ 125—57) совместно с добавкой поташа (ГОСТ 4221—65). В качестве ускорителя схватывания цементных смесей применяется жидкое стекло (ГОСТ 13079—67).

Для приготовления газобетона применяется вода, пригодная для питья. Сточные и болотные воды, а также воды, загрязненные вредными для цемента примесями, имеющие более 1% сульфатов от веса воды (в пересчете на SO_3), нельзя использовать для затворения газобетонной смеси

Приготовление газобетонной смеси и формование изделий

Получение газобетонной смеси заданного объемного веса и прочности — один из важных переделов технологического процесса производства.

Метод подбора объемного веса ячеистых бетонов на основе пенообразователей и газообразователя с применением различных вяжущих и кремнеземистых компонентов изложен подробно в «Инструкции по технологии изготовления изделий из ячеистых бетонов» (СН 277-70)

Здесь рассмотрим в общих чертах, как производится подбор объемного веса и оптимального состава газобетона на основе смешанного вяжущего, широко применяемого при производстве газобетонных изделий.

Прежде всего опытным путем устанавливают текучесть и температуру газобетонной смеси с таким расчетом, чтобы при определенном расходе алюминиевой пудры получить газобетон заданного объемного веса с равномерной структурой.

Расход алюминиевой пудры определяют по формуле

$$A = \frac{V - \left(\frac{Ц}{d_ц} + \frac{И}{d_и} + \frac{П}{d_п} + B\right)}{k\alpha}, \qquad (9)$$

где A — количество алюминиевой пудры в *г*; V — объем газобетонной смеси для заполнения форм, увеличенный на 3—5% с учетом образования «горбушки», в *л*; $Ц$ — количество цемента в *кг*; $И$ — количество извести в *кг*; $П$ — количество песка в *кг*; B — количество воды в *л*; d — удельный вес в *кг/л*; k — количество газа, получаемого из 1 *г* алюминиевой пудры при температуре 38—40° С, равное 1,4 *л*; α — коэффициент использования алюминиевой пудры, принимаемый равным, в зависимости от объемного веса газобетона, 0,7—0,9.

Для определения оптимальных значений текучести и температуры смеси в лабораторных условиях на принятом составе изготовляют пробные замесы, которые на ±2 *см* отличаются от исходных значений по текучести и на ±3° С по температуре смеси. Исходные значения текучести и температуры смеси в зависимости от заданного объемного веса устанавливают по табл. 4.

Таблица 4

Исходные значения текучести и температуры смеси для подбора объемного веса газобетона

Объемный вес газобетона в *кг/м³*	Текучесть в *см*	Температура смеси в °С
400	34	43
500	30	42
600	26	41
700	22	40
800	18	39
900	15	38
1000	14	37

Так, например, при исходных значениях текучести 26 *см* и температуре смеси 41° С для пробных замесов за-

данного состава принимают: по текучести —24, 26 и 28 *см*; по температуре — 38, 41 и 44° С.

Для принятого состава необходимо изготовить девять пробных замесов. Различные значения по текучести достигаются изменением количества воды затворения.

Газобетонную смесь из каждого пробного замеса заливают в стаканы объемом не менее 500 *см*³. Число изготовленных образцов для каждого замеса должно быть не менее 3. Через 1 *ч* после окончания вспучивания определяют объемный вес газобетонной смеси. Пересчитывают объемный вес газобетонной смеси на объемный вес газобетона в сухом состоянии по формуле

$$\gamma_{сух} = \frac{\gamma_{см}}{k(1 + B/T)}, \qquad (10)$$

где $\gamma_{сух}$ — объемный вес газобетона в сухом состоянии в *кг/м*³; $\gamma_{см}$ — объемный вес газобетонной смеси в *кг/м*³; k — коэффициент, учитывающий гидратную воду, принимаемый равным 0,85 для газобетона объемного веса 400—600 *кг/м*³ и 0,9 — для газобетона объемного веса 700 и 800 *кг/м*³; B/T — отношение веса воды к весу вяжущих и молотого песка

Таблица 5

Составы для пробных замесов

Замес	Цемент	Известь	Песок
1	20	20	60
2	25	20	55
3	15	20	65
4	20	25	55
5	20	15	65

Текучесть газобетонной смеси определяют на приборе Суттарда по диаметру расплыва смеси с точностью до 5 *мм*. Для этого производят четыре отсчета показаний шкалы в противоположных концах двух взаимно перпендикулярных диаметров измерительного диска. Среднее арифметическое из этих четырех показаний и будет характеризовать текучесть газобетонной смеси.

Чтобы установить оптимальное соотношение вяжущих и кремнеземистого компонента, подбирают состав с таким расчетом, чтобы получить требуемую прочность газобетона при наименьшем расходе вяжущего. Так, для газобетона на смешанном (известково-цементном) вяжущем изготовляют пробные замесы, составы которых приведены в табл. 5.

Для получения оптимального состава необходимо изготовить пять пробных замесов. Из каждого замеса изготовляют по шесть образцов-кубов размером 10×10×

×10 *см*. После автоклавной обработки и высушивания до постоянного веса определяют их объемный вес и предел прочности при сжатии. На основании полученных результатов устанавливают состав смеси.

Газобетонную смесь приготовляют в специальных смесительных механизмах — газобетономешалках. От точности дозировки отдельных составляющих зависит качество и однородность газобетонной смеси.

Крупноразмерные газобетонные изделия формуют в металлических формах, которые должны иметь строго определенные размеры, с тем чтобы получать изделия с установленными допусками. Формы должны быть достаточно жесткими, чтобы предотвратить образование трещин в отформованных изделиях при погрузке их на вагонетки и при транспортировании в автоклавы. Нельзя крепить траверсы к бортам открывающихся форм, так как это приводит к увеличению зазоров в месте примыкания бортов друг к другу и к поддонам. Если в формах есть зазоры, то при заполнении их газобетонной смесью в этих местах смесь вытечет и нарушатся геометрические размеры изделий. Скобы для траверс приваривают к поддонам. Толщина скобы должна быть не менее 12 *мм*.

При подготовке форм необходимо соблюдать следующие правила. При раскладке их в заливочном отделении, а также при штабелировании необходимо следить за тем, чтобы формы опирались на четыре точки во избежание искривления. До заполнения форм газобетонной смесью их очищают, смазывают внутреннюю поверхность и собирают. Для очистки форм применяют металлические приводные скребки, щетки и сжатый воздух.

Для смазки используют петролатумно-керосиновую смесь (1 : 2 или 1 : 3), солидоло-керосиновую смесь (1 : 1), автол, веретенное и другие машинные масла в смеси с керосином (1 : 1). Смазывают формы пневматическими распылителями. Толщина слоя должна быть 0,2—0,4 *мм*. Петролатум разогревают до температуры 60—80° С в ванне с паровой рубашкой до капельно-жидкого состояния и при легком помешивании вливают керосин.

При сборке форм устанавливают требуемые закладные детали и арматурные каркасы в соответствии с проектом на изделия. Перед укладкой в формы арматурные каркасы и закладные детали покрывают антикоррозионными обмазками в соответствии с инструкцией СН 277-70. По опыту свердловского завода «Стройдеталь-70»

целесообразно антикоррозионное цементно-битумное покрытие наносить на арматурные каркасы с помощью краскораспылителей в электростатическом поле высокого напряжения. Нанесение осуществляется в специальной камере, в которую подаются арматурные каркасы в подвешенном состоянии. Электростатическое поле в камере создается генератором марки ЭРГ-150. Из камеры электроокраски арматурные каркасы поступают в сушильную камеру, где производится их сушка при температуре 40—50° С.

Подготовленные под заливку формы устанавливают в формовочном отделении с обеих сторон по пути движения газобетономешалки. Формы заполняют газобетонной смесью на определенную высоту с таким расчетом, чтобы после окончания вспучивания они были заполнены полностью. Высота заполнения форм смесью зависит от объемного веса газобетона. При изготовлении изделий малого объемного веса требуется заполнить формы смесью на меньшую высоту и наоборот.

Высоту заполнения формы газобетонной смесью определяют по формуле

$$h = 1{,}2\, h_0 \frac{\gamma_{см}}{\gamma_р}\,, \qquad (11)$$

где h — высота заливки газобетонной смеси в форму в *см*; h_0 — высота формы в *см*; $\gamma_{см}$ — объемный вес газобетонной смеси в *кг/м³*; $\gamma_р$ — объемный вес раствора без газообразователя в *кг/м³*.

Для того чтобы вспучивание смеси протекало нормально, температура окружающей среды должна быть не ниже 20° С. С этой целью помимо установки отопительных приборов в формовочном отделении прокладывают тепловые регистры в местах раскладки форм под заливку. При таких условиях продолжительность выдерживания форм, заполненных газобетонной смесью до срезания «горбушки», составляет 3—4 *ч*. После окончания срока созревания газобетона срезают «горбушку» и формы укладывают на вагонетки. Вагонетки с изделиями перемещают в автоклав плавно, без толчков. Для этого рельсовые пути должны быть тщательно очищены, стыки рельсов подогнаны и выверены.

В настоящее время на заводах ячеистого бетона, особенно в зарубежных странах, широко применяется резательная технология формования изделий. По этой технологии на заводах используются формы одного размера, например, в зарубежной практике чаще всего формы размером 0,6×1,5×6 *м*. Отформованный в них ячеистый бетон, обладающий в первые часы схватывания и твердения небольшой прочностью, разрезается до автоклавной обработки на изделия нужных размеров. Для разрезки чаще всего используются проволоки (струны). При вертикальной разрезке получаются плиты шириной 0,6 *м* и длиной 6 *м* и различной толщины в зависимости от шага струн. При горизонтальной разрезке получаются плиты шириной 1,5 *м* и длиной 6 *м* различной толщины. При разрезке отливки шириной 1,5 *м* и длиной 6 *м* различной толщины вертикальными струнами вдоль и поперек получаются мелкие блоки (камни) длиной, равной высоте (толщине) отливки. Для разрезки применяются резательные машины различных систем. В последнее время применяются машины, способные разрезать отливки высотой 1,2 *м* и более.

При резательной технологии обеспечивается высокая точность размеров и прямолинейность граней изделий; поверхности изделий получаются ровными без маслянистых пятен; заполнение автоклава повышается, снижается металлоемкость производства, резко уменьшается количество ручных операций.

В СССР разработана новая технология получения газобетона с применением комплексной вибрации на стадиях приготовления ячеистой смеси и формования. Технология предложена и разработана ВНИИСтромом, ВНИИЖелезобетоном, ВЗИСИ, МИСИ им. В. В. Куйбышева и Рижским политехническим институтом. По этой технологии осуществляется вибрирование смеси в процессе ее приготовления в вибросмесителях, а также после заливки в формах на специальных виброплощадках. Исследованиями, проведенными в указанных научно-исследовательских институтах [23, 40, 45], определены оптимальные технологические параметры по вибрационной технологии для получения крупноразмерных газобетонных изделий с применением различных вяжущих и кремнеземистых компонентов. Установлено, что вибрационное воздействие при изготовлении ячеистых смесей способствует увеличению поверхности взаимодействия частиц сырьевых компонентов, интенсифицирует процессы гидратации вяжущего и сокращает длительность газовыделения.

Особенности структурообразования в ячеистых смесях при вибротехнологии позволили в производственных усло-

3 150

виях значительно сократить длительность вызревания отформованных изделий, и наряду с этим стало возможным осуществить перемещение форм сразу же после окончания вспучивания. Изготовление изделий по этой технологии позволяет приготавливать смеси с пониженным количеством воды затворения и получать газобетон с улучшенными физико-техническими свойствами.

К преимуществам этой технологии следует также отнести значительное сокращение времени выдержки изделий до автоклавной обработки, возможность применения конвейера при формовании изделий, что уменьшает потребность в производственных площадях формовочного отделения.

Автоклавная обработка изделий

Тепловлажностная обработка завершает технологический процесс производства изделий из ячеистого бетона. Установление оптимального режима запаривания — важнейшая задача, так как мощность заводов определяется в значительной степени производительностью автоклавов. С. А. Мироновым и другими авторами установлено, что при назначении оптимальных режимов запаривания газобетонных изделий необходимо также учитывать физические процессы, которые происходят на отдельных стадиях автоклавной обработки [22, 37, 46, 53, 54].

По А. В. Волженскому, автоклавная обработка происходит в три стадии.

В первой стадии запаривания, при повышении температуры в автоклаве, отформованное изделие, обладающее незначительной прочностью, подвергается воздействию ряда физических процессов, которые при известных условиях могут привести к нарушению структуры и понижению прочности газобетона.

В начале запаривания, при пуске пара, одновременно с повышением температуры происходит дополнительное насыщение газобетона влагой за счет конденсации насыщенного пара при соприкосновении его с поверхностью изделия, температура которого значительно ниже. В дальнейшем, при температуре среды автоклава выше 100° С прогрев изделия значительно ускоряется, что сопровождается увеличением влажности газобетона и перепада температур по сечению изделия.

Повышение температуры приводит к нарастанию линейных деформаций, которые стабилизируются в начале изотермической выдержки. Прочность газобетона на этой стадии запаривания незначительна и не превышает 5—10% конечных значений.

Форсированный подъем давления пара в автоклаве с предварительным удалением из него воздуха, а также уменьшение общей продолжительности первой стадии запаривания предотвращают развитие деструктивных процессов, способствуют ускорению прогрева изделий и приводят к уменьшению суммарных деформаций газобетона.

Во второй стадии происходит выравнивание температур по сечению изделия. Решающим фактором, влияющим на ускорение этого процесса, является продолжительность подъема давления пара в первой стадии запаривания (табл. 6).

Таблица 6

Продолжительность прогрева газобетонных изделий объемного веса 750 *кг/м³* в процессе запаривания

Время подъема температуры в автоклаве до 180° С в *ч*	Время в *ч* с момента пуска пара в автоклав, за которое происходит полный прогрев изделия толщиной в *мм*			
	100	200	240	300
1	2	5	6,5	9,5
2	2,5	5,5	7	10,5
4	4,5	7	8,5	12
6	6,5	8,5	10	13
8	8,5	10	11,5	14,5

Когда температура газобетона достигает максимальных значений (не менее 174° С), происходит интенсивное взаимодействие вяжущего с кремнеземистым компонентом с образованием гидросиликатов кальция и других цементирующих новообразований. В результате прочность газобетона возрастает. При этом наружные и близлежащие к ним слои вследствие более быстрого прогрева по сравнению с центральными слоями газобетона значительно раньше приобретают максимальную прочность.

Через определенное время после полного прогрева изделия в зависимости от вида применяемого вяжущего газобетон приобретает примерно одинаковую прочность по всему сечению. На этой стадии автоклавной обработки деформации расширения от воздействия температуры стабилизируются, несмотря на наличие градиента температур и продолжающийся прогрев изделия.

Наружные слои, которые уже к началу изотермической выдержки приобрели значительно бо́льшую прочность, продолжающую интенсивно нарастать со значи-

тельным опережением прочности внутренних слоев, как бы обжимают ядро изделия. Благодаря этому суммарные деформации в больших образцах имеют меньшие значения. Определенное влияние на уменьшение деформаций оказывает также форсированный подъем температуры в первой стадии запаривания. На второй стадии автоклавной обработки происходит также изменение веса газобетона за счет испарения свободной воды. Этот процесс особенно интенсивно протекает в первые часы изотермической выдержки, когда происходит прогрев бетона по всему сечению. Воздух, заполняющий поры газобетона, при нагревании расширяется, увеличивается в объеме и создает избыточное давление по отношению к среде автоклава.

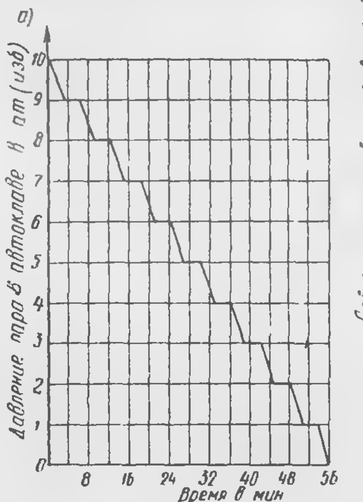
Для получения изделий с максимальной и одинаковой прочностью газобетона по всему сечению необходимо продолжительность изотермической выдержки устанавливать в зависимости от толщины изделия, объемного веса газобетона и вида вяжущего, а также длительности первой стадии запаривания.

Для уменьшения влажности ячеистого бетона рекомендуется в процессе изотермической выдержки применять насыщенный пар в сочетании с перегретым. Перегретый пар с температурой до 350° С подается в автоклав за 3—4 *ч* до окончания продолжительности изотермической выдержки. При этом соблюдается условие, чтобы давление пара в автоклаве не повышалось, для чего производится по мере необходимости частичный перепуск пара в другой автоклав.

На **третьей стадии** запаривания, при снижении давления и температуры в автоклаве, изделие продолжает подвергаться сложным воздействиям среды, физические свойства которой непрерывно изменяются. При снижении давления размеры образцов уменьшаются, приближаясь к первоначальным. Одновременно влага, находящаяся в порах газобетона, оказывается перегретой. Вследствие этого возникает перепад давления и по всему объему изделия начинается интенсивное испарение воды

В производстве изделий из газобетона очень важно установить оптимальные параметры снижения давления пара. Для увеличения оборачиваемости автоклавов и форм целесообразно, чтобы эта стадия запаривания завершалась в возможно более короткий срок. Вместе с тем

вследствие образования большого количества пара, перемещающегося по порам и капиллярам бетона, быстрое снижение давления в автоклаве может привести к возникновению напряжений, превышающих прочность бетона. Чтобы предотвратить образование трещин на этой стадии, К. Э. Горяйнов и И. Б. Заседателев [24] рекомендуют снижать давление таким образом, чтобы объем пара, выходящего из изделия, в течение всего периода был одинаковым. Необходимо учитывать, что если 1 *кг* испаряющейся влаги при давлении 8 *ат* (изб.) занимает объем около 0,23 $м^3$, то при давлении пара 1,5 *ат* (изб.) объем



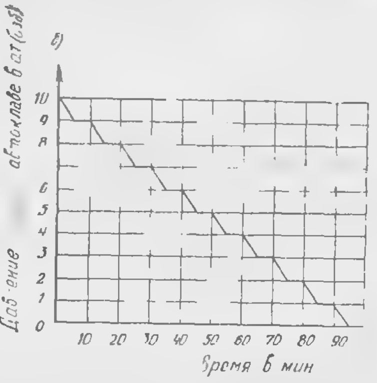


Рис. 11. Графики снижения давления пара по ступенчатому режиму

а — для крупноразмерных изделий толщиной 200—240 *мм*; *б* — то же, толщиной 300 *мм*

составляет уже около 1,3 $м^3$, т. е. почти в 6 раз больше. Следовательно, наиболее опасна конечная стадия удаления пара из автоклава. Учитывая, что испарение происходит не с открытой поверхности, а по всей толщине изделия и что паропроводность ячеистого бетона невысока, при непрерывном уменьшении давления в автоклаве пар будет постепенно накапливаться в изделии, создавая перепад давления, который по мере снижения давления в автоклаве будет возрастать. При определенных условиях напор пара в изделии вызовет большие напряжения растяжения, способные разрушить структуру газобетона. Это происходит в заводской практике при автоклавной обработке крупноразмерных изделий толщиной 240—

Таблица 7

Оптимальные режимы запаривания изделий из ячеистого бетона

Изделия	Толщина в *мм*	Продолжительность периода в *ч*				Общая продолжительность запаривания в *ч*
		подъем давления до 10 *ат* (изб.)	выдержка при 10 *ат* (изб.)	снижение давления до атмосферного по ступенчатому режиму	вакуумирование автоклава	
Панели объемного веса 600—800 $кг/м^3$ стен жилых и промышленных зданий	200	1	[illegible]	1	1	10
	240	1	8	1	1	11
	300	1	10	1,5	1	13,5
Теплоизоляционные изделия объемного веса 400—500 $кг/м^3$	100	1	5	0,5	1	7,5
	200	1	6	1	1	9
	300	1	8	1,5	1	11,5

Примечания: 1. Для автоклавов с давлением пара 8 *ат* продолжительность изотермической выдержки увеличивается на 1 *ч*, а с давлением пара 12 *ат* уменьшается на 1 *ч*. Для газошлакобетона продолжительность изотермической выдержки увеличивается на 2 *ч*.

2. Графики снижения давления по ступенчатому режиму за 1 и 1,5 *ч* приведены на рис. 11.

300 *мм*, если не соблюдается режим снижения давления пара.

Для резкого сокращения продолжительности третьей стадии автоклавной обработки применяется ступенчатый режим снижения давления пара в автоклаве. Продолжительность сброса на одну ступень, равную 1 *ат*, устанавливается с учетом объемного веса и размера изделия. Перед каждым последующим снижением на 1 *ат* производится выдержка, за время которой перепад давления, возникающий по сечению изделия, уменьшается или имеет тенденцию к значительному снижению. При таких условиях снижение давления на каждой последующей ступени не вызывает увеличения критического перепада давления и образования внутри газобетона напора пара, способного нарушить структуру газобетона.

При назначении ступенчатого режима снижения давления пара (рис. 11) для крупноразмерных изделий толщиной 200—300 *мм* из газобетона объемного веса 600—800 $кг/м^3$ необходимо, чтобы критический перепад давления (КПД) удовлетворял условию: КПД $\leqslant$ 1,2 *ат*. Для аналогичных изделий из конструктивного газобетона объемного веса 900—1000 $кг/м^3$ КПД $\leqslant$ 1,5 *ат*.

После снижения давления производится вакуумирование автоклава по способу МИИТа до остаточного давления 150 *мм. рт. ст.* — при этом влажность ячеистого бетона уменьшается на 7—5%, температура снижается до 60° С.

Рекомендуемые оптимальные режимы автоклавной обработки различных изделий из ячеистого бетона приведены в табл. 7. После автоклавной обработки изделия извлекаются из форм и подвергаются соответствующей отделке согласно рекомендациям СН 277-70.

4. ДЕЙСТВУЮЩИЕ ПРЕДПРИЯТИЯ И ПРОЕКТЫ ТИПОВЫХ ЗАВОДОВ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА

Начиная с 1960 г. в нашей стране получили развитие заводы по производству изделий преимущественно из газобетона взамен пенобетона. Первым большим предприятием по выпуску крупноразмерных изделий из газобетона явился Новосибирский завод мощностью 40 тыс $м^3$ в год.

В основу производственного процесса положена технологическая схема изготовления газобетонных изделий на смешанном вяжущем (цемент и молотая известь-кипелка). Полученный в мельнице шлам перекачивается пневматическими камерными насосами СМ-550 по трубопроводам в нижние бассейны емкостью 28 $м^3$ каждый. В бассейнах установлены шламмешалки и подведен сжатый воздух, который способствует получению смеси постоянного объемного веса. Из этих нижних бассейнов шлам перекачивается в верхние (расходные). На каждый смесительный агрегат имеется по два бассейна, используемых поочередно; пока из одного бассейна расходуется шлам, в другом производится его корректировка в соответствии с заданными объемным весом и температурой. Подача шлама в газобетономешалку регулируется объемным дозатором. На этом же дозаторе смонтирована пропеллерная мешалка емкостью 20 *л* для приготовления

водной суспензии алюминиевой пудры, которая по отдельному трубопроводу поступает в газобетономешалку.

Цемент со склада подается пневмотранспортом в расходные бункера смесительного отделения.

Комовая известь поступает на прирельсовый склад завода и оттуда по подземной галерее — в цех помола извести. Здесь ее дробят, а затем измельчают в шаровой мельнице СМ-14 совместно с песком (соотношение 1 : 0,25).

Молотая известь-кипелка системой шнеков и элеваторов направляется в расходный бункер смесительного отделения. Цемент и молотая известь-кипелка из автоматического весового дозатора ДЦ-1200 поступают через сборную воронку в газобетономешалку. Туда же дозируется двуводный гипс для регулирования газоудерживающей способности смеси. Смесь приготовляется в передвижной газобетономешалке емкостью 4,5 $м^3$.

В пол формовочного отделения вмонтированы регистры, по которым проходит подогретая вода. Выдерживание форм на теплом полу улучшает условия вспучивания и схватывания газобетонной смеси. В каждом пролете формовочного отделения имеется мостовой кран грузоподъемностью 5 *т*. Он используется для установки форм под заливку. Этот же кран комплектует составы вагонеток с формами для последующей автоклавной обработки изделий.

Выдержка отформованных газобетонных изделий перед автоклавной обработкой длится 4 *ч*. После этого составы из трех вагонеток (по четыре формы на каждой) при помощи реверсивного толкателя подаются на электропередаточный мост СМ-546 для загрузки в автоклавы. На заводе установлено семь непроходных автоклавов СМ-545 диаметром 2,6 и длиной 19,1 *м* с быстрооткрывающимися крышками. После тепловлажностной обработки изделия направляют на склад готовой продукции, где производят распалубку форм и отделку панелей.

В главном производственном корпусе находятся помольное, смесительное, формовочное и автоклавное отделения. К нему примыкает крытый склад готовой продукции с помещением для нанесения антикоррозионной обмазки на арматурные каркасы, для распалубки и отделки изделий. Известково-помольное отделение и склад комовой извести расположены отдельно вблизи главного корпуса.

Предприятие размещено на территории действующего завода железобетонных изделий. Это позволяет пользоваться для хранения цемента и песка имеющимися складами, а также коммуникациями, снабжающими производство паром, водой и электроэнергией.

Трестом Тагилстрой построен газобетонный завод, технологическая схема которого представлена на рис. 12.

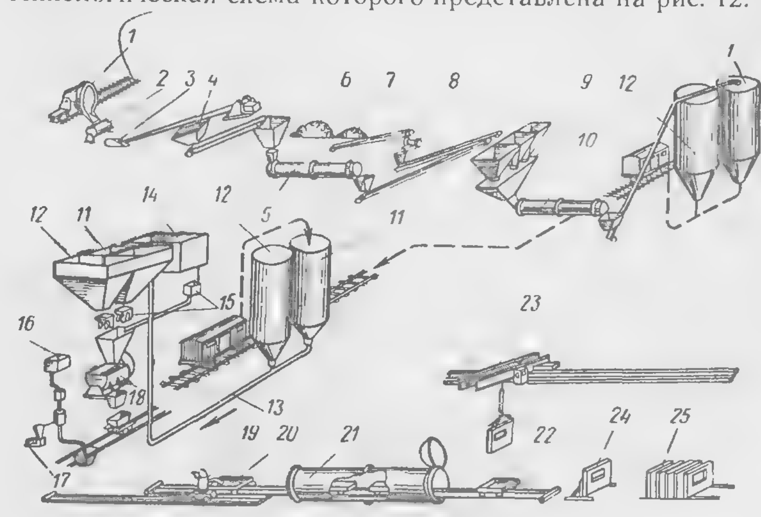


Рис. 12. Технологическая схема изготовления стеновых панелей из автоклавного газошлакобетона

1 — шлаковозный ковш; *2* — грануляционный барабан; *3* — скреперная установка; *4* — бункер с решеткой; *5* — сушильный барабан; *6* — известь; *7* — гипс; *8* — дробилка для извести и гипса (щековая); *9* — тарельчатые питатели; *10* — мельница; *11* — известково-шлаковый порошок; *12* — зола ТЭЦ; *13* — пневмотрубопровод; *14* — вода; *15* — дозаторы; *16* — сульфитно-спиртовая барда; *17* — весы для алюминиевой пудры; *18* — растворомешалка; *19* — мешалка раздатчик; *20* — вагонетка с формой; *21* — автоклав; *22* — место распалубки изделий; *23* — мостовой кран; *24* — участок отделки изделий; *25* — склад готовой продукции

Изделия изготовляют из газошлакозолобетона без применения клинкерного цемента. Исходными материалами для получения газошлакозолобетона являются: известково-шлаковый порошок, зола-унос, газообразователь и вода.

Состав известково-шлакового порошка в %: гранулированного доменного шлака 85; извести-кипелки 10; гипса двуводного 5. Химический состав используемых доменных шлаков и золы-уноса приведен в табл. 8.

Таблица 8

Химический состав доменного шлака Нижне-Тагильского металлургического комбината и применяемой золы-унос в %

Материал	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	MnO	FeO	S	SO_3	Модуль основности	П.п.п.
Доменный шлак	37,18	15,85	—	38,16	6,21	0,7	0,11	0,181	—	0,837	—
Зола-унос	53,08	28,75	9,73	3,66	2,46	—	—	—	0,9	—	1,11

Известково-шлаковый порошок размалывают до тонкости помола, характеризующейся остатками на сите 0,2—0%, а на сите 008—12%. Начало схватывания 1 *ч* 40 *мин,* а конец схватывания — 5 *ч* 5 *мин.*

В процессе освоения производства, которое осуществлялось НИИЖБ в содружестве с трестом Тагилстрой, был установлен следующий расход материалов на 1 $м^3$ газозолошлакобетона (табл. 9).

Таблица 9

Расход материалов на 1 $м^3$ газозолошлакобетона в *кг*

Материал	Объемный вес газошлакобетона в $кг/м^3$	
	800	1000
Доменный молотый шлак	384	493
Известь-кипелка	50	58
Гипс двуводный	16	25
Зола-унос	270	397
Алюминиевая пудра ПАК-3	0,4	0,34

На этих составах изготавливают различные виды изделий, в том числе панели для жилищного строительства размером «на комнату».

В 1965 г. вступили в строй 10 крупных заводов ячеистого бетона, технологическое оборудование для которых поставлено из Польской Народной Республики. Проектная производительность каждого завода 185 тыс. $м^3$ в год. Несмотря на то, что заводы в основном предназначались

для изготовления мелких блоков, был освоен выпуск панелей стен промышленных зданий размером 6×1,5 *м* и различных крупноразмерных изделий для ограждающих конструкций жилых и промышленных зданий. На этих заводах предусмотрено изготовление изделий по различным технологическим схемам.

На рис. 13 показан завод ячеистого бетона, предназначенный для выпуска газозолосиликатных изделий.

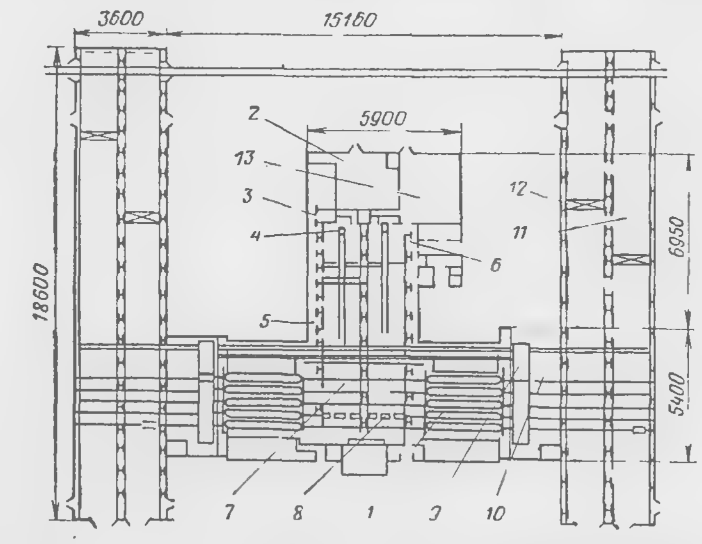


Рис. 13. Завод ячеистого бетона производительностью 185 тыс. $м^3$ в год

1 — автоклавы; *2* — шаровые мельницы; *3* — приготовление эмульсии; *4* — самоходные газомешалки-раздатчики; *5* — посты формовки; *6* — переработка отходов; *7* — резательные машины; *8* — автоклавные тележки; *9* — электропередаточные тележки; *10* — разгрузочное отделение; *11* — склады готовой продукции; *12* — мостовые краны; *13* — арматурное отделение

Золу-унос из электрофильтров ТЭЦ перекачивают по пневмозолопроводу на расстояние 800 *м* на завод ячеистого бетона. Примерно $^1/_3$ используемой золы размалывают в трехкамерных шаровых мельницах вместе с негашеной известью. Первичная известково-зольная смесь содержит 24—28% активной извести. Удельная поверхность продукта помола колеблется от 5000 до 6000 $см^2/г$. После перемешивания в гомогенизаторах с остальной частью немолотой золы получается смесь извести и золы

в соотношении 1 : 3 или 1 : 4 в зависимости от качества сырья.

Ячеистую смесь приготовляют в самоходной лопастной газобетономешалке вертикального типа полезной емкостью около 4,6 $м^3$. Температура газозолосиликатной смеси при заливке составляет 40—50° С, диаметр расплыва смеси 16—18 *см* (в зависимости от свойств извести). Автоклавная обработка изделий производится при давлении пара 12 *ат* (изб.).

Гипростромом с участием Гипростроммаша, Промстройпроекта и другими проектными организациями был разработан ряд типовых решений технологических линий, размещаемых в унифицированных пролетах размером 144×18 *м*. Из этих пролетов в зависимости от конкретных условий можно создавать как самостоятельные, так и сблокированные с производством железобетонных изделий цехи и заводы ячеистого бетона. Опыт привязки таких пролетов показал, что по технико-экономическим показателям они несколько уступают узкоспециализированным заводам. Для районов с большим сосредоточенным строительством Гипростромом в содружестве с научно-исследовательскими и специализированными машиностроительными институтами созданы типовые проекты заводов ячеистого бетона мощностью 120 (шифр 404-10-4/70) и 220 (шифр 409-10-9/70) тыс. $м^3$ в год. Проектами предусматривается изготовление стеновых панелей, мелких блоков, а также изделий из плотного силикатного бетона [14].

Продукция завода мощностью 120 тыс. $м^3$ в год может обеспечить крупными панелями наружных и внутренних стен ежегодно строительство жилых домов общей площадью около 100 тыс. $м^2$ или стеновыми панелями для возведения промышленных зданий производственной площадью до 500 тыс. $м^2$ в год. Главный корпус завода производительностью 120 тыс. $м^3$ размещен в трехпролетном здании размером в плане 204×54 *м*.

Для завода производительностью 220 тыс. $м^3$ (рис. 14) принято пятипролетное здание размером в плане 192×90 *м*. Помольное отделение сблокировано с главным производственным корпусом. Технология производства изделий из ячеистых бетонов базируется на применении комплексной вибрации при приготовлении смесей и формовании изделий. Для получения газобетона предусматривается использование трехкомпонентного вяжущего,

изготовляемого путем совместного помола извести, песка и цемента до удельной поверхности 5000 $см^2/г$ в двухкамерных шаровых мельницах размером 2×10,5 *м*. Из мельницы после помола вяжущее поступает для усреднения в гомогенизаторы, откуда камерными насосами подается в расходные бункера смесительного отделения. В качестве

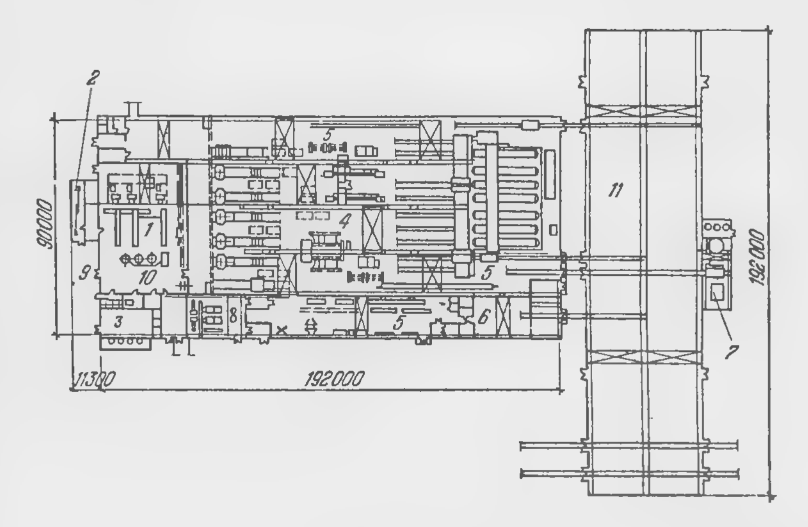


Рис. 14. План производственного корпуса типового завода (шифр 409-10-9/70)

1 — помольное отделение; *2* — отделение гомогенизации; *3* — компрессорная; *4* — формовочно-запарочное отделение; *5* — отделение складирования панелей; *6* — механическая мастерская; *7* — арматурное отделение; *8* — участок для нанесения антикоррозийной обмазки; *9* — участок для приготовления алюминиевой суспензии, *10* — участок для приготовления эмульсионной смазки для форм; *11* — склад готовой продукции

кремнеземистого компонента применяется песок, который подвергается мокрому помолу до удельной поверхности 2000—2500 $см^2/г$. Для стабилизации шлама при помоле песка вводится до 3% извести. Песчаный шлам подают в шламбассейны, оборудованные соответствующими перемешивающими устройствами, и, после его корректировки, камерными насосами подают в расходные баки, установленные в смесительном отделении. В типовых проектах предусмотрена автоматизация процессов переработки сырья, гомогенизации вяжущего и дозирования материалов. Алюминиевая суспензия с добавкой ПАВ приготов-

ляется в отдельном помещении и насосами перекачивается в соответствующие дозаторы смесительного отделения.

Для формования изделий в формах большой емкости приготовление газобетонной смеси осуществляется в виброгазобетономешалке емкостью 5 $м^3$. Для загрузки компонентов Гипростромом разработаны специальные весовые дозаторы с большим объемом дозирования с тензометрическим устройством. Управление дозировочным узлом производится в автоматическом режиме с пульта управления, расположенного в отдельном помещении.

Изделия формуют в металлических формах емкостью до 5,4 $м^3$, установленных на виброплощадках с горизонтально направленными колебаниями. При изготовлении мелких блоков отливка поступает на резательную машину конструкции ВНИИСтроммаша и Гипростропа, которая выпускается Минстройдормашем.

Арматурный цех оснащен современным оборудованием. Собранные пространственные каркасы на горизонтальных и вертикальных установках покрывают цементно-полистирольной антикоррозийной обмазкой. Нанесение антикоррозийной обмазки на каркасы и их сушка производятся на установке, размещенной в изолированном вентилируемом помещении.

Автоклавная обработка изделий осуществляется в автоклавах диаметром 3,6 *м* при избыточном давлении пара 10 *ат* (изб.) с автоматическим управлением.

Большое внимание в проектах уделено отделке панелей на специальной конвейерной линии. Отделочных конвейеров два: первый используется для затирки и оснащения панелей столярными изделиями, второй — для покраски и нанесения гидрофобного покрытия на их поверхность. Операции по перемещению форм на конвейере полностью механизированы и автоматизированы.

Глава II

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Физико-механические характеристики ячеистых бетонов определяют область их целесообразного использования в практике строительства. При установлении физико-механических свойств бетона используют методику ГОСТ 12852—67 [25].

Для испытания ячеистых бетонов из готовых изделий или контрольных неармированных блоков выпиливают или высверливают контрольные образцы: кубы, цилиндры, призмы. В случае необходимости можно испытывать контрольные блоки или изделия в натуральную величину [26—29].

Контрольные образцы вырезают из изделий или блоков не ближе 2 *см* от их граней. Если толщина изделия менее 24 *см*, контрольные образцы берут только из средней части.

Прочность и деформации ячеистых бетонов при кратковременном и длительном действии нагрузки определяют на призмах размерами 10×10×30; 15×15×60 и 20×20×80 *см*, выпиленных из неармированных блоков или отформованных в металлических формах. Призмы 10×10×30 *см*, как и контрольные кубы с ребром 10 *см*, перед испытаниями высушивают до постоянного веса, а призмы бóльших размеров испытывают при естественной влажности в возрасте 28 суток и более.

Сопротивление ячеистых бетонов осевому растяжению определяют испытанием кубов или цилиндров, высушенных до постоянного веса, либо специальных призм или «восьмерок», а сопротивление изгибу и срезу — соответственно испытанием балок и призм специальной конфигурации.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ

Объемный вес ячеистого бетона является одной из важнейших его характеристик и в значительной мере определяет и другие физико-механические свойства. Объемный вес ячеистого бетона зависит от удельного веса строительного раствора межпоровых стенок, количества пор (пустот), образовавшихся в результате введения в строительный раствор пустотообразователя (пены или газа) и от водовяжущего отношения. Чем больше при изготовлении смеси введено газа (пены) и чем выше ее водовяжущее отношение, тем меньше объемный вес ячеистого бетона.

Для ограждающих конструкций зданий (наружных стен, покрытий), которые должны обеспечивать достаточную теплоизоляцию, целесообразно применять ячеистые бетоны малого объемного веса, а для межквартирных перегородок и межэтажных перекрытий, где требуется повышенная звукоизоляция, — большего объемного веса.

В настоящее время ячеистые бетоны изготовляют объемным весом в сухом состоянии $\gamma_c = 300 \div 1200$ *кг/м³*. По области применения их подразделяют на следующие группы:

теплоизоляционные — объемным весом от 300 до 400 *кг/м³*;

конструктивно-теплоизоляционные — объемным весом от 500 до 900 *кг/м³*;

конструктивные — объемным весом от 1000 до 1200 *кг/м³*.

Приведенные значения объемного веса γ_c являются средними, отклонения от этих значений не должны превышать ± 50 *кг/м³*.

В нормативных документах кроме средних значений γ_c ячеистых бетонов (иногда необоснованно называемых максимальными) приведены необходимые для проектирования зданий нормативные значения объемного веса $\gamma_н$, учитывающие естественную влажность бетона в момент отпуска с завода, которая достигает 15—25% и более, и ориентировочный вес арматуры в изделиях.

Кроме того, ячеистые бетоны делятся на классы А и Б. К классу А относятся ячеистые бетоны автоклавного

твердения, а к классу Б — безавтоклавного, а также автоклавного твердения, но изготовленные на заводах, где технология производства недостаточно освоена. Подразделение ячеистых бетонов на классы определяется кубиковой прочностью бетона при заданном объемном весе (см. ниже).

Нормативные значения объемного веса ячеистых бетонов, используемые для определения собственного веса конструкций при их расчете на прочность и жесткость, приведены в табл. 10.

Таблица 10

Нормативные значения объемного веса ячеистых бетонов в конструкциях

Конструкции	Нормативные значения объемного веса $\gamma_н$ в *кг/м³* при среднем объемном весе γ_c в *кг/м³*									
	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
Бетонные:										
класса А	350	450	600	700	850	950	1100	1200	1300	1450
» Б	400	550	700	850	950	1100	1200	1300	1450	—
Железобетонные:										
класса А	—	—	650	800	950	1050	1200	1300	1400	1550
» Б	—	—	800	950	1050	1200	1300	1400	1550	—

Удельный вес межпоровой стенки ячеистых бетонов $\gamma_у$ меняется в зависимости от исходных материалов в пределах от 2000 до 2700 *кг/м³*. Для отечественных ячеистых бетонов на золе $\gamma_у = 2000$ *кг/м³*, а на кварцевом песке — 2700 *кг/м³* [30, 49]; для шведских ячеистых бетонов $\gamma_у = 2500$ *кг/м³* [88]; для венгерских $\gamma_у = 2350 \div 2650$ *кг/м³* [70].

Плотность, пористость и структура. Строительные свойства ячеистых бетонов в значительной степени определяются относительной плотностью или пористостью материала.

Под относительной плотностью бетона $d_п$ понимают отношение объемного веса в сухом состоянии γ_c к удельному весу $\gamma_у$. У пористых материалов, к которым относятся ячеистые бетоны, величина относительной плотности $d_п$ меньше единицы, так как $\gamma_c < \gamma_у$.

Пористость количественно определяется объемом пор в единице объема ячеистого бетона.

Показатель истинной (общей) пористости $П_и$ характеризуется полным объемом открытых и закрытых пор в единице объема; эту величину вычисляют по формуле

$$П_и = \left(1 - \frac{\gamma_c}{\gamma_y}\right) 100\%. \qquad (12)$$

Показатели истинной пористости $П_и$ ячеистого бетона в зависимости от объемного и удельного весов приведены в табл. 11.

Таблица 11

Показатели истинной пористости ячеистого бетона

Ячеистый бетон	Истинная пористость в % при объемном весе бетона в $кг/м^3$										Литературный источник
	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	
На кварцевом песке, $\gamma_y = 2500$ $кг/м^3$	88	84	80	76	72	68	64	60	56	52	[49]
То же, $\gamma_y = 2700$ $кг/м^3$	89	85	82	78	74	70	67	63	59	55	[30]
На золе, $\gamma_y = 2000$ $кг/м^3$	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	[49]
На цементе и кварцевом песке, $\gamma_y = 2650$ $кг/м^3$	89	85	81	77	74	70	66	62	59	55	[70]
На извести и кварцевом песке, $\gamma_y = 2350$ $кг/м^3$	87	88	79	74	70	66	62	58	53	49	[70]

Показатель мнимой (открытой) пористости $П_м$ ячеистого бетона характеризуется суммарным объемом открытых пор в единице объема материала. Этот показатель устанавливают путем насыщения сухого ячеистого бетона водой и значение его вычисляют по формуле

$$П_м = \frac{G_в - G_c}{V} 100\%, \qquad (13)$$

где $G_в$ — вес образца после насыщения водой в $г$; G_c — вес образца, высушенного до постоянного веса, в $г$; V — объем образца в $м^3$.

Показатели мнимой пористости зависят от способа насыщения ячеистого бетона водой (погружение в холодную воду, кипячение в воде и т. д.).

Для данного вида ячеистого бетона показатель открытой пористости по величине всегда меньше истинной пористости $П_м < П_и$.

Замкнутая пористость может быть определена как разность истинной и открытой пористости:

$$П_з = П_и - П_м. \qquad (14)$$

Структура ячеистого бетона не однородна. Затвердевший ячеистый бетон состоит из замкнутых или открытых макропор и межпоровых стенок, содержащих в свою очередь микропоры и микрокапилляры. На строительные свойства ячеистого бетона оказывают большое влияние размеры пор и их однородность, толщина и свойства межпоровых стенок.

В структуре отечественных ячеистых бетонов макропоры имеют круглую и эллиптическую неправильную форму с рваными краями; часто встречаются цепочки из 2—3 пор длиной 5—6 *мм* [49]. Структура шведских ячеистых бетонов состоит из круглых закрытых макропор диаметром 0,5—1,55 *мм*, разделенных межпоровыми стенками; межпоровые стенки пронизаны микропорами, имеющими диаметры, меньшие, чем макропоры [88]. Микропоры, как правило, являются открытыми и обеспечивают связь между макропорами.

Исследования показали, что прочность бетона зависит не только от численной величины пористости, но и от равномерности распределения пор по сечению, толщины и прочности межпоровых стенок, однородности пор и стенок. Можно полагать, что прочность ячеистого бетона при сжатии выше у тех образцов, у которых структура более равномерная.

Размеры макропор некоторых видов ячеистых бетонов приведены в табл. 12; в ней средние диаметры макропор $d_{ср}$, средние квадратические отклонения в размерах макропор σ_d и коэффициенты вариации (изменчивости) размеров макропор C_v^d вычислены по формулам:

$$d_{ср} = \frac{\sum n_i d_i}{n}; \qquad (15)$$

Таблица 12

Размеры макропор ячеистых бетонов и показатели их изменчивости

Материал	Шифр образца	$\gamma_с$, кг/м³	$R_с$, кгс/см²	$d_{мин}$, мм	$d_{макс}$, мм	$d_{ср}$, мм	σ_d, мм	C_v^d
Пенобетон	ПБ-14	475	39,2	0,2	1,4	0,364	0,246	0,7
	ПБ-26	1040	107	0,1	0,5	0,188	0,141	0,75
Пеносиликат	ПС-18	490	37,6	0,2	0,8	0,275	0,133	0,66
Газобетон	ГБ-15	815	83,4	0,2	2,2	0,607	0,468	0,77
	ГБ-11	1000	84,1	0,2	1,2	0,435	0,294	0,55
Газосиликат	ГС-201	900	50,8	0,2	2,2	0,556	0,493	0,88
	ГС-210	1185	105,8	0,2	1,2	0,503	0,267	0,55
	ГС-20	1085	180,7	0,2	1,4	0,326	0,156	0,48
	ГС-42	400	22,3	0,2	2,2	0,736	0,437	0,6
Газозолосиликат	ГЗС-4	400	15	0,2	1,6	0,65	0,476	0,73

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{\Sigma n_l\,(d_l - d_{ср})^2}{n}}; \qquad (16)$$

$$C_v^d = \frac{\sigma_d}{d_{ср}}, \qquad (17)$$

где n — общее число пор; d_l — среднее значение диаметра пор по группе; n_l — число пор, входящих в данную группу.

Из приведенных данных видно, что нельзя установить четкой зависимости между прочностью при сжатии контрольных образцов-кубов и средним размером макропор $d_{ср}$. В наших образцах размеры макропор колебались от 0,188 до 0,736 *мм,* причем меньшему размеру макропор не всегда соответствовала бóльшая прочность при сжатии.

Основной причиной, из-за которой не было выявлено влияние размера макропор на прочность контрольных образцов-кубов при сжатии, по нашему мнению, следует считать неравнопрочность межпоровых стенок.

Коэффициент изменчивости C_v^d в наших опытах для отдельных образцов колебался от 0,48 до 0,88, составляя в среднем 0,67. Хотя меньшим значениям C_v^d, как это видно из табл. 12, в ряде случаев соответствуют бóльшие значения прочности, все же установить четкой зависимости между C_v^d и $R_с$ не удалось. Так, были случаи, когда при близких величинах C_v^d значения $R_с$ резко отличались.

Ячеистые бетоны, изготовленные по вибротехнологии, имеют более равномерное распределение пор. Г. Я. Куннос [40] установил, что уменьшение C_v^d для вибрированного газобетона в 1,75 раза, по сравнению с обычным газобетоном, приводит к повышению прочности при сжатии вибрированного бетона примерно в 2 раза.

По данным А. П. Меркина и А. П. Филина, коэффициент изменчивости диаметра пор C_v^d вибрированного газосиликата в 1,6 раза меньше, чем обычного, поэтому прочность при сжатии вибрированного газосиликата в 1,5 раза больше. А. П. Филин установил также, что с увеличением диаметра и изменчивости размеров макропор уменьшается прочность при сжатии ячеистого бетона.

Большинство работ, проведенных в области исследования структуры ячеистого бетона, было направлено на выявление размера и однородности макропор и их

влияния на прочность этого материала. Однако макропоры не оказывают решающего влияния на несущую способность ячеистого бетона, и в связи с этим в последние годы больше внимания начали уделять прочности и деформативности межпоровых стенок-мембран, которые воспринимают все внешние воздействия (усилия).

Исследования В. А. Пинскера [61] показали, что прочность при сжатии ячеистого бетона не зависит от диаметра пор, но связана с равномерностью их распределения; он также указывает на влияние сопротивления растяжению межпоровой стенки на прочностные показатели ячеистого бетона.

А. Т. Барановым и К. И. Бахтияровым показано, что прочность ячеистого бетона зависит от качества межпустотного материала и пористой структуры ячеистого бетона [6].

К. Э. Горяйнов [23] отмечает большое влияние межпоровых стенок-мембран на показатели прочности ячеистого бетона.

В ЦНИИСК и НИИЖБ для выбранных 10 образцов (см. табл. 12) были вычислены линейным способом толщины межпоровых стенок $\delta_{ст}$ и величины изменчивости их размеров. Значения толщин межпоровых стенок, их средних квадратических отклонений $\sigma_{\delta_{ст}}$ и коэффициентов вариации $C_v^{\delta_{ст}}$, вычисленных по формулам, аналогичным формулам (15) — (17), приведены в табл 13. Как видно из этих данных, толщины межпоровых стенок в среднем колеблются от 0,16 до 0,6 *мм*; в отдельных образцах межпоровые стенки имели толщины от 0,05 до 1,8 *мм*.

Коэффициент изменчивости толщин межпоровых стенок колебался от 0,5 до 0,89, составляя в среднем $C_{v_{ср}}^{\delta_{ст}} = 0{,}71$. Вычисления показали, что максимальную прочность имеют те ячеистые бетоны, которые характеризуются минимальными $C_v^{\delta_{ст}}$.

Из проведенного анализа макроструктуры некоторых видов ячеистых бетонов следует, что предлагаемые различными исследователями модели рабочей структуры ячеистого бетона с порами сферической, сотовой или иной формы при одинаковом размере макропор и межпоровых стенок весьма условны и значительно отличаются от действительной макроструктуры. Действительная

Таблица 13

Размеры толщин межпоровых стенок и показатели их изменчивости

Материал	Шифр образца	γ_c, *кг/м³*	R_c, *кгс/см²*	$\delta_{ст.мин}$, *мм*	$\delta_{ст.макс}$, *мм*	$\delta_{ст.ср}$, *мм*	$\sigma_{\delta_{ст}}$, *мм*	$C_v^{\delta_{ст}}$
Пенобетон	ПБ-14	475	39,2	0,05	0,6	0,363	0,298	0,8
	ПБ-26	1040	107	0,09	0,3	0,158	0,096	0,61
Пеносиликат	ПС-18	490	37,6	0,05	0,6	0,289	0,232	0,8
Газобетон	ГБ-15	815	83,4	0,05	0,9	0,39	0,248	0,632
	ГБ-11	1000	84,1	0,05	1	0,483	0,295	0,61
Газосиликат	ГС-201	900	50,8	0,05	1,1	0,312	0,264	0,85
	ГС-210	1185	105,8	0,2	1,3	0,577	0,348	0,6
	ГС-20	1085	180,7	0,05	1,2	0,358	0,179	0,5
	ГС-42	400	22,3	0,05	1,8	0,592	0,506	0,85
Газозолосиликат	ГЗС-4	400	15	0,05	1,4	0,467	0,414	0,89

Таблица 14

Расчетная установившаяся (средняя) влажность ячеистых бетонов

Ячеистый бетон	Расчетная установившаяся средняя влажность ($W_{р.б}$) в % (по весу)			
	для стен и междуэтажных перекрытий	для покрытий: вентилируемых	для покрытий: невентилируемых	для чердачных перекрытий при вентилируемых чердаках
На заполнителях из кварцевого песка	8	12	16	6
На зольном заполнителе	15	[illegible]	25	10

форма макропор очень далека от сферической, сотовой или какой-либо другой правильной геометрической формы. Практически макропоры имеют разнообразную форму и размеры, которые не описываются геометрическими фигурами правильной формы; это же относится и к межпоровым стенкам, толщина которых также непостоянна.

Таблица 15

Водопоглощение ячеистых бетонов

γ_c, кг/м³	W, % по объему	W, % по весу	$П_и$, %	Степень заполнения пор водой в %
300	21	70	88	24
400	23	57	84	27
500	26	52	80	32
600	28	47	76	37
700	30	43	72	41
800	33	41	68	48
900	35	39	64	55
1000	38	38	60	63
1100	40	36	56	71
1200	42	35	52	81

Влажность ячеистых бетонов оказывает большое влияние на их прочность, теплопроводность и другие свойства.

В зависимости от вида ячеистого бетона, его объемного веса и технологии изготовления влажность после автоклавной обработки колеблется в значительных пределах: от 20 до 40% (по весу). Применение вибротехнологии позволяет снизить влажность бетона до 15—25% [23, 40].

В процессе эксплуатации элементы конструкций из ячеистых бетонов постепенно высыхают. Через 1—2 года эксплуатации в нормальных условиях в ограждающих ячеистобетонных конструкциях устанавливается постоянная равновесная влажность, которая в среднем не превышает значений, приведенных в табл. 14. Эту установившуюся влажность принимают за расчетную, которую надлежит учитывать при статических и теплотехнических расчетах.

Водопоглощение ячеистого бетона обусловливается его большой пористостью. Величину водопоглощения определяют по тем же формулам, что и влажность [25]. Показатели водопоглощения ячеистых бетонов приведены в табл. 15.

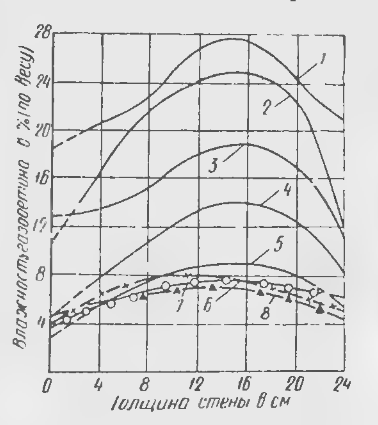


Рис. 15. Динамика изменения влажности в наружной стене из газобетона

1 — перед отправкой на монтаж; *2* — через 1 месяц; *3* — через 7 месяцев; *4* — через 10 месяцев; *5* — через 18 месяцев; *6* — через 5 лет; *7* — через 6 лет; *8* — через 7 лет

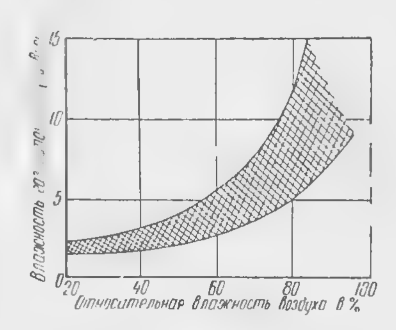


Рис. 16. Равновесная остаточная влажность газобетона при обычной температуре воздуха

Сорбционное увлажнение ячеистого бетона зависит в первую очередь от его структуры, вида, величины и расположения пор, а также от температурно-влажностных условий окружающей среды. Подробно методика определения сорбционных свойств ячеистых бетонов описана в [25].

На рис. 15 показан характер изменения влажности наружной стены из газобетона в процессе эксплуатации жилого дома в Ленинграде [30], а на рис. 16 — диаграмма увлажняемости шведского газобетона в зависимости от относительной влажности воздуха [88].

Средние опытные значения сорбционной влажности ячеистых бетонов в зависимости от их объемного веса и относительной влажности среды приведены в табл. 16.

Данные о сорбционной влажности разные исследователи приводят как в процентах по весу, так и по объему.

Таблица 16

Сорбционная влажность ячеистых бетонов

$\gamma_с$, *кг/м³*	$W_{с.о}$ в % по объему при относительной влажности воздуха в %				
	40	60	80	97	100
300	0,7	1,1	1,5	2	3,1
400	0,8	1,2	2	5	7,5
500	1,4	1,8	2,9	6,2	9,4
600	1,7	2,2	3,2	7,5	10,5
700	2	2,6	4	8,5	12
800	2,4	3	4,5	10	14,5
900	2,8	3,4	5,2	12	16
1000	3,2	3,8	6	13	18
1100	3,4	4,2	6,5	14	20
1200	3,5	4,5	7	15	22

Для перехода от влажности по объему $W_{с.о}$ к влажности по весу $W_{с.в}$ пользуются известной формулой

$$W_{с.в} = \frac{1000\,W_{с.о}}{\gamma_с}. \qquad (18)$$

Так как относительная влажность воздуха влияет на влажность ячеистого бетона, применение изделий из этого бетона в зданиях с повышенной влажностью воздуха следует ограничить.

Капиллярный подсос происходит через микрокапилляры в межпоровых стенках; всасывающая способность самих макропор невелика. Величина капиллярного подсоса определяет степень увлажнения ограждающей ячеистобетонной конструкции под дождем и скорость испарения влаги в процессе эксплуатации. Исследования П. Нерепста [56] показали, что капиллярный подсос и водопроницаемость газобетона ниже, чем у кирпича. К аналогичному выводу пришел О. Граф [86]. Результаты его испытаний по определению капиллярности разных материалов приведены в табл. 17.

На графике (рис. 17) показано увлажнение газобетона при капиллярном подсосе. Испытания были проведены по следующей методике. Образцы размером 50×50×100 *мм* покрывали водонепроницаемой мастикой, а открытой торцовой поверхностью погружали в воду на 3—6 *мм* [30].

Таблица 17

Капиллярность газобетона и кирпича

Материал	Объемный вес в *кг/м³*	Содержание воды в образце[1] в % по объему			
		непосредственно после погружения	через 3 *ч*	через 24 *ч*	через 10 суток
Сплошной обожженный кирпич	1570	0,15	18	26,8	29,2
Пустотелый обожженный кирпич	660	0,4	53,5	55,4	58,3
Газобетон	620	7,2	13,1	17,5	17,8
»	480	3,2	12,1	18,4	22,1

[1] Образец 12×6×24 *см*, погруженный в воду на глубину 3 *см*.

Морозостойкость ячеистого бетона характеризуется его способностью в насыщенном водой состоянии выдерживать требуемое по условиям долговечности или сроку службы конструкции определенное число циклов

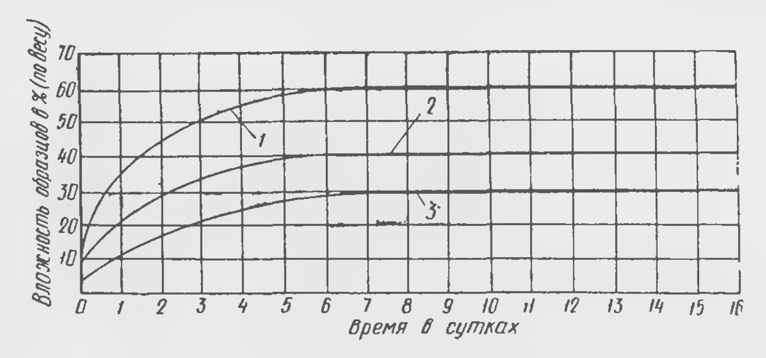


Рис. 17. Увлажнение автоклавного газобетона при капиллярном подсосе влаги

1, 2, 3 — объемный вес соответственно 400, 700 и 1000 *кг/м³*

попеременного замораживания и оттаивания. При испытании на морозостойкость [25] прочность ячеистого бетона не должна снижаться более чем на 25%. Минимальная марка по морозостойкости для ограждающих конструкций из ячеистых бетонов должна быть согласно нормам не менее Мрз 25. Такая морозостойкость должна обеспечиваться в наружных ограждающих конструкциях

зданий с сухим и нормальным режимом помещений; для зданий с влажным режимом помещений принимается Мрз 35 и выше; для внутренних конструкций бетон может иметь марку Мрз 15.

Относительно высокая морозостойкость ячеистых бетонов объясняется их высокой пористостью. При увлажнении ячеистого бетона в атмосферных условиях водой заполняются в основном микрокапилляры за счет сорбции из окружающего воздуха; крупные же поры и макрокапилляры заполняются водой не полностью, поэтому при замораживании в свободное пространство отжимается вода из микрокапилляров, не вызывая разрушений межпорозых стенок.

Таблица 18

Морозостойкость автоклавных ячеистых бетонов

Число циклов замораживания и оттаивания	Потеря прочности в % газобетоном объемного веса в $кг/м^3$	
	700	1000
5	3	3
10	3	5
15	12	10
20	9	11
25	20	18

Опыт эксплуатации конструкций из ячеистых бетонов показал, что наибольшей морозостойкостью обладают бетоны на цементе, а наименьшей — на извести. При соблюдении требований технологии можно получить ячеистый бетон на извести, удовлетворяющий требованиям по морозостойкости. Однако наблюдаются случаи недостаточной морозостойкости бетона, в частности, изготовленного на некондиционной извести. При усиленном увлажнении с последующим воздействием мороза такие конструкции при эксплуатации подвержены разрушению.

Результаты испытаний на морозостойкость автоклавных ячеистых бетонов приведены в табл. 18 [30]. Коэффициент морозостойкости $K_{Мрз} = R_{Мрз} : R_с$ всегда выше 0,75, а в ряде случаев $K_{Мрз}$ близок к 1. Некоторые виды ячеистых бетонов, изготовленных на оптимальных составах, выдерживают 100 и даже 150 циклов попеременного замораживания и оттаивания [38, 49].

Усадка и набухание ячеистых бетонов оцениваются по различным методикам, поэтому результаты таких исследований трудно сравнивать. По данным отечественных и зарубежных исследований, деформации усадки автоклавных ячеистых бетонов, изготовленных на основе цемента (шлака) и песка, достигают 0,5—0,7 *мм/м* и более для бетонов, изготовленных на основе извести и золы, а безавтоклавных бетонов — 2 *мм/м* и более; деформации набухания зависят от условий хранения ячеистого бетона и достигают 0,4—1,6 *мм/м*.

В качестве примера на рис. 18 приведены графики изменения усадки ячеистых бетонов во времени по данным советских и чехословацких исследователей [84]. На

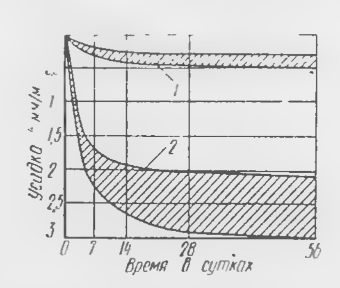


Рис. 18. Изменения деформаций усадки ячеистого бетона во времени

1 — автоклавный; *2* — безавтоклавный

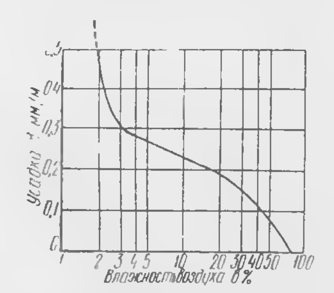


Рис. 19. Графики деформаций усадки ячеистых бетонов в зависимости от относительной влажности воздуха помещения

рис. 19 [88] приведены изменения усадки ячеистого бетона во времени по данным шведских исследователей, а на рис. 20 — деформации набухания при попеременном увлажнении и высушивании бетона [11].

Как правило, деформации усадки устанавливают на образцах-призмах размером 40×40×160 *мм*.

В настоящее время разработана методика определения усадки ячеистых бетонов на индикаторном приборе конструкции НИИЖБ [25]. Величину линейной усадки определяют на трех призмах размером 40×40×160 *мм*, выпиливаемых из изделия, подлежащего испытанию. Образец измеряют с помощью прибора, показанного на рис. 21. Прибор состоит из стойки, кронштейна, нижней опоры с конусообразным выступом и индикатора с ценой деления 0,01 или 0,001 *мм*, позволяющего устанавливать изменение длины образца. Продольная ось образца при горизонтальном формовании должна быть перпендикулярна направлению вспучивания ячеистого бетона, а при вертикальном — параллельна направлению большей геометрической оси изделия. В середину торцовых

сторон образца заделывают для закрепления его в приборе металлические реперы. Образцы насыщают водой, погружая их в горизонтальном положении на глубину 5 *мм*. По истечении трех суток образцы вынимают из воды, устанавливают в прибор, делают отсчет по индикатору, принимая его за начальный. Затем образцы взвешивают и помещают в герметичную емкость (например,

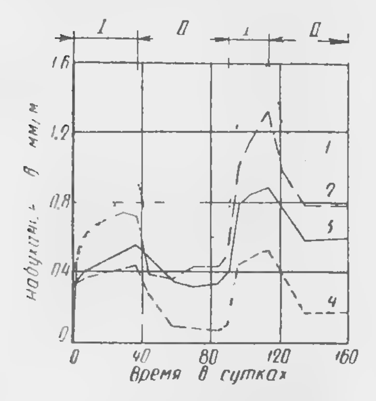


Рис. 20. Деформации набухания ячеистых бетонов

I — выдержка в воде; *II* — выдержка при относительной влажности 10%; *1*—*4* — кривые деформаций

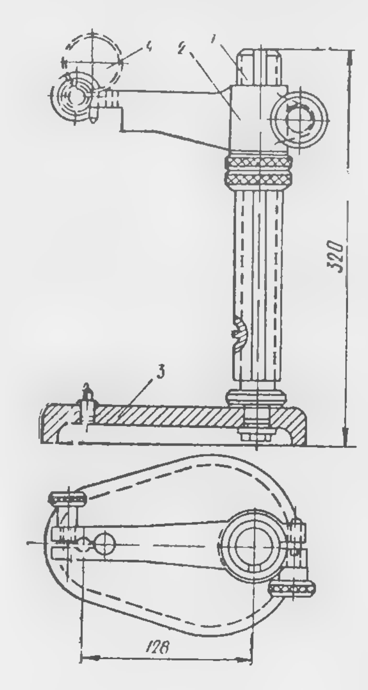


Рис. 21. Прибор для определения усадки ячеистых бетонов

1 — стойка; *2* — кронштейн; *3* — нижняя опора; *4* — индикатор

в эксикатор) над безводным карбонатом калия (в количестве 200 *г*) при температуре 20±2° С. В этих условиях их выдерживают в течение 28 суток. Через каждые 7 суток проверяют длину и вес образцов, одновременно заменяя увлажненный карбонат калия сухим.

После определения линейной усадки образцы высушивают до постоянного веса с целью определения их конечной и начальной влажности. По истечении 28 суток для каждой призмы вычисляют линейные изменения по формуле

$$\varepsilon_{yc} = \frac{\Delta l}{l}, \qquad (19)$$

где ε_{yc} — усадка в *мм/м*; Δl — разность между конечным и начальным показателями индикатора в *мм*; l — длина призмы через 28 суток, измеренная штангенциркулем, в *м*.

Усадку и влажность вычисляют как среднее арифметическое результатов определения трех образцов; при этом учитывают начальную и конечную влажность призм.

Исследования усадки ячеистых бетонов по данной методике показали, что величина ε_{yc} для разных видов автоклавных ячеистых бетонов меняется от 0,1 до 1 *мм/м* и в ряде случаев значительно отличается от величин ε_{yc}, определенных по другим методикам.

Температурно-влажностные деформации. Изменение объема ячеистых бетонов происходит в результате попеременного увлажнения и высыхания, нагревания и остывания, замерзания и оттаивания. При этом уменьшение или увеличение размеров ячеистобетонных элементов часто приводит к их растрескиванию, что связано с развитием внутренних напряжений, превышающих сопротивление ячеистого бетона растяжению.

Изменения объема ячеистобетонных элементов в результате изменения температурно-влажностных условий окружающей среды характеризуются коэффициентом температурно-влажностного расширения бетона α.

Зависимость коэффициента α от изменения температуры и влажности выражается формулой, предложенной Г. И. Вейденбаумом [17]:

$$\alpha = [\alpha_0 + AW + BW^2 + (CW + DW^2)\,t]\,10^{-6}, \qquad (20)$$

где A, B, C и D — постоянные эмпирические коэффициенты; W — весовая влажность в %; t — температура материала; α_0 — коэффициент температурного линейного расширения ячеистого бетона.

Для отечественных и зарубежных ячеистых бетонов [88, 77] коэффициент линейного расширения как бетонных, так и железобетонных конструкций при их охлаждении и нагреве от 0 до 100° С принимают равным $\alpha_0 = 0{,}000008$.

Данные по деформации ячеистых бетонов при попеременном замораживании и оттаивании приведены в работе [17].

Паропроницаемость и воздухопроницаемость ячеистых бетонов являются важными свойствами, которые необходимо учитывать при проектировании

ограждающих конструкций. Под паро- и воздухопроницаемостью ячеистых бетонов понимается способность материала пропускать через себя соответственно пар или воздух; методика определения этих характеристик дана в [25]. Ориентировочные значения паро- и воздухопроницаемости отечественных ячеистых бетонов [49] приведены в табл. 19.

Таблица 19

Коэффициенты паро- и воздухопроницаемости ячеистых бетонов

γ_c, *кг/м³*	Коэффициент паропроницаемости $\mu \cdot 10^3$, *г/м·ч·мм рт. ст.*	Коэффициент воздухопроницаемости $i \cdot 10^3$, *кг/м·ч·мм вод. ст.*
300	3,3	9
400	2,7	7
500	2,25	5
600	1,75	3,5
700	1,55	2,5
800	1,4	2
900	1,4	1,5
1000	1,4	1
1100	1,4	0,75
1200	1,4	0,5

Таблица 20

Коэффициенты теплопроводности отечественных ячеистых бетонов

γ_c, *кг/м³*	Коэффициент теплопроводности в *ккал/м·ч·град*	
	λ_c	$\lambda_в$ (W=8 % по весу)
300	0,08	0,13
400	0,09	0,15
500	0,1	0,16
600	0,12	0,19
700	0,14	0,21
800	0,17	0,24
900	0,2	0,27
1000	0,22	0,29
1100	0,26	0,32
1200	0,3	0,37

Теплопроводность ячеистого бетона характеризуется коэффициентом теплопроводности, величина которого определяется в соответствии с рекомендациями ГОСТ 7076—66. Численные значения коэффициента теплопроводности ячеистого бетона в сухом состоянии λ_c и при некоторой влажности $\lambda_в$ [49, 84] приведены в табл. 20 и 21.

Теплоемкость ячеистого бетона характеризуется коэффициентом удельной теплоемкости. Для ячеистых бетонов $\gamma_c = 300 \div 1200$ *кг/м³* коэффициент удельной теплоемкости, по данным разных исследователей, меняется в пределах от 0,15 до 0,25 *ккал/кг·град*.

Звукоизоляционные свойства ячеистых бетонов определяют способность ограждающих конструкций задерживать звук. В табл. 22 приведены значения

Таблица 21

Коэффициенты теплопроводности зарубежных ячеистых бетонов

Ячеистый бетон	W, % (по весу)	$\lambda_в$, *ккал/м·ч·град* бетона объемного веса в *кг/м³*				
		400	500	600	700	900
Газосиликат	8	0,13	0,14	0,16	0,2	0,3
	12	0,15	0,16	0,18	0,22	0,33
	18	0,18	0,19	0,21	0,25	0,36
Газобетон	8	0,14	0,17	0,21	0,25	0,33
	12	0,15	0,19	0,24	0,29	0,39
	18	0,17	0,22	0,28	0,34	0,46

звукоизоляции стен из ячеистых бетонов по данным зарубежных авторов [84].

Исследования звукоизоляции, проведенные на зданиях, построенных из газобетонных блоков [30], показали, что при объемном весе внутренних поперечных стен $\gamma_c = 1000 \div 1200$ *кг/м³* и толщине 24 *см* их звукоизолирующая способность составила 48 *дб*, что удовлетворяет требованиям СНиП; в этих зданиях вес 1 *м²* стены составляет 240—288 *кг*. Согласно нормам минимальный вес 1 *м²* стены, необходимый для обеспечения требуемой звукоизоляции, составляет 300 *кг*.

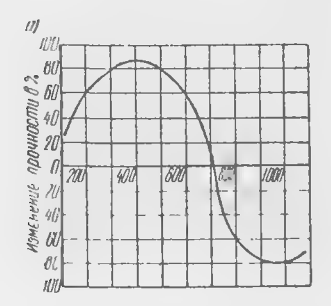
Таблица 22

Звукоизоляционные характеристики стен из ячеистых бетонов

Толщина стены в *см*	Средняя звукоизоляция в *дб* при объемном весе бетона в *кг/м³*		
	500	700	900
8	34	36	38
16	38	41	42
19	40	42	43
24	41	43	45

Огнестойкость. Ячеистый бетон огнестоек [39]. Испытания пенобетонных кубов показали, что пенобетон выдерживает одностороннее воздействие огня (800° С) без особых разрушений в течение 4 *ч*. Огнестойкость пеносиликата оказалась более высокой: при $\gamma_c = 700 \div 800$ *кг/м³* и толщине образца 8 *см* под действием огня (1270° С) пеносиликат не подвергся разрушению в течение 2 *ч* 38 *мин*. Под действием струи воды поверхность раскаленного образца разрушилась незначительно. Опытами установ-

лено, что при нагревании до 100—150° С и последующем охлаждении прочность пенобетона возрастала на 10%; при нагревании до 200—300° С прочность оказалась такой же, как и до нагревания; при нагревании до 400—500° С прочность снизилась на 20%, а при нагревании до 550—800° С — на 50% по сравнению с прочностью до нагрева. Таким образом, огнестойкость ячеистых бетонов выше, чем обычных тяжелых бетонов.



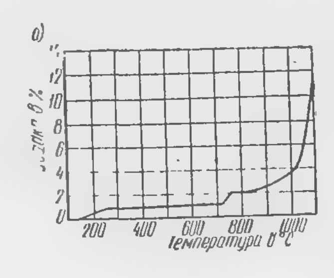


Рис. 22. Изменения предела прочности при сжатии (*а*) и деформаций усадки (*б*) ячеистых бетонов в зависимости от температуры

По шведским данным [88], при нагревании примерно до 1000° С ячеистый бетон начинает спекаться. Для полного плавления его требуется нагревать до температуры 1100—1200° С.

На рис. 22 показаны графики деформации усадки и изменения предела прочности при сжатии в результате нагревания ячеистых бетонов до различных температур [79].

Хрупкость. Ячеистый бетон — это хрупкий материал, он легко разрушается от незначительных ударов, местных перенапряжений, поэтому с ячеистобетонными изделиями следует обращаться осторожно, особенно при транспортировании.

Обрабатываемость. Ячеистые бетоны и изделия из них легко пилятся, режутся, рубятся, строгаются, сверлятся, в них легко забиваются гвозди, скобы и штыри. Учитывая абразивность материала, для его обработки рекомендуется применять инструменты из твердых сплавов.

Цвет. В зависимости от исходных материалов и способа тепловлажностной обработки цвет ячеистых бетонов может быть белым, серо-белым, серо-синим, серокрасным и стальным [82].

3. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ

Прочность бетона

Кубиковая прочность ячеистого бетона при сжатии — одна из основных его характеристик. Определяют предел прочности при сжатии ячеистых бетонов (контрольную характеристику) на образцах-цилиндрах диаметром и высотой 100 *мм* или образцах-кубах с размером ребра 100 *мм*. Для испытания берут шесть образцов. Их высушивают до постоянного веса и испытывают на сжатие после остывания.

Предел прочности при сжатии ячеистобетонных контрольных образцов зависит от направления сжимающей нагрузки относительно направления заливки ячеистобетонной смесью. Исследования [89] показали, что предел прочности при сжатии кубов при испытании нагрузкой, направленной перпендикулярно направлению заливки $R^{\perp}$, на 20—30% выше предела прочности при сжатии кубов, испытанных нагрузкой, направленной параллельно направлению заливки $R^{\parallel}$. В среднем можно принять $R^{\perp} \approx \approx 1{,}25 R^{\parallel}$. Поэтому испытания образцов на сжатие проводят в положении, соответствующем работе изделия в конструкции. При горизонтальном формовании изделий сжимающая сила должна прилагаться перпендикулярно направлению заливки бетонной смеси, при вертикальном — параллельно или перпендикулярно в зависимости от работы изделия в конструкции.

Опорные поверхности выпиленных или высверленных образцов перед испытанием должны быть отшлифованы. Образцы устанавливают одной из шлифованных граней на нижнюю опорную плиту пресса, центрально по его оси, пользуясь разметкой, нанесенной на плите. Под одной из опорных плит пресс должен иметь сферическую опору. Давление на образец должно возрастать равномерно со скоростью 2—3 *кгс/см²* в 1 *сек* до его разрушения

Предел прочности бетона при сжатии (контрольную характеристику вычисляют с точностью до 1 *кгс/см²* как

среднее арифметическое из результатов испытания шести образцов. Результаты испытаний, отличающиеся на ±20% от среднего значения (не более двух), отбрасывают.

Зависимость кубиковой прочности ячеистого бетона от его объемного веса может быть выражена эмпирическими формулами, связывающими средние величины $R_с$ и $\gamma_с$.

Например, в практике пользуются следующей зависимостью [49]:

$$R_с = A\gamma_с^2 \ кгс/см^2, \quad (21)$$

где A — конструктивный коэффициент, величина которого может меняться в значительных пределах. Так, например, для отечественных ячеистых бетонов автоклавного твердения заводского изготовления A равен 100, для бетонов лабораторного и полупроизводственного изготовления — 140. Для отечественных бетонов безавтоклавного твердения $A=75\div85$. Для ячеистых бетонов, выпускаемых в ПНР, $A=140$ — при испытании кубов силой, перпендикулярной направлению заливки бетонной смеси в форму, и $A=105$ — при испытании кубов силой, параллельной направлению заливки [89]. Для датских автоклавных ячеистых бетонов [56] $A=77$ и для безавтоклавных $A=28{,}5$.

А. П. Меркин и А. П. Филин предлагают предел прочности при сжатии ячеистых бетонов определять по формуле

$$R_с = a\gamma_с + b\sigma \ кгс/см^2, \quad (22)$$

где a и b — постоянные величины, зависящие от пористости бетона; σ — среднеквадратическое отклонение от средней прочности.

В. А. Пинскер [61] рекомендует прочность ячеистого бетона вычислять в зависимости от прочности бетона межпоровых стенок $R_м$ по формуле

$$R_с = R_м\left(1 - 1{,}1\sqrt[3]{П}\right) \ кгс/см^2, \quad (23)$$

где $П$ — макропористость, определяемая в зависимости от объемного веса ячеистого бетона $\gamma_с$ и бетона межпоровой стенки $\gamma_м$: $П = 1 - \dfrac{\gamma_с}{\gamma_м}$.

По К. И. Бахтиярову и А. Т. Баранову [6, 7], зависимость между объемным весом и прочностью бетона выражается формулой

$$R_с = R_м\left(\frac{\gamma_с}{\gamma_м}\right)^3 \ кгс/см^2. \quad (24)$$

Формулы (22)—(24) могут быть использованы для вычисления кубиковой прочности при различных значениях объемного веса и пористости ячеистого бетона.

Имеются и другие эмпирические формулы, выражающие зависимость между кубиковой прочностью и объемным весом ячеистых бетонов [89, 90, 91]. Однако ни одна из них не является универсальной, пригодной для всех видов отечественных и зарубежных бетонов. На рис. 23 приведены графики $R_с - \gamma_с$, построенные по формуле (21) при различных значениях коэффициента A, которые показывают, в каких пределах меняется прочность ячеистых бетонов отечественного производства при данном объемном весе.

По результатам работ шведских исследователей [88] предел прочности при сжатии контрольных кубов с ребром 150 *мм* при остаточной влажности $W \leqslant 10\%$ для объемных весов 400, 500 и 650 *кг/м³* соответственно равен 15, 30 и 65 *кгс/см²*.

В табл. 23 приведены контрольные характеристики $R_с$ для отечественных ячеистых бетонов и соответствующие им показатели $\gamma_с$; в ней же даны величины проектной марки бетона R, являющиеся основным исходным показателем в нормативных документах.

Таблица 23

Объемный вес, контрольная характеристика и проектная марка ячеистых бетонов

Класс ячеистого бетона	$\gamma_с$, кг/м³ при $R_с$ и R, кгс/см²						
	25/15*	35/25	50/35	75/50	100/75	150/100	200/150
А	500	600	700	900	1000	1100	1200
Б	600	700	800	1000	1100	1200	

* Слева от черты приведены показатели $R_с$, справа — R.

За проектную марку бетона R принимается временное сопротивление сжатию в *кгс/см²* кубов с ребром 200 *мм*, испытанных при естественной влажности 8% (по весу) — для ячеистых бетонов на кварцевом песке и 15% (по весу) — для ячеистых бетонов на золе. Для перехода от контрольной характеристики $R_с$ к проектной марке бетона R применяется переходный коэффициент $K_п$:

$$K_п = R : R_с = 0{,}7. \quad (25)$$

Коэффициент перехода $K_п$ представляет собой произведение поправочных коэффициентов, учитывающих влияние на прочность при сжатии размера образца и влажности.

Влияние размера контрольных образцов на прочность при сжатии, по данным отечественных и зарубежных исследователей [49, 89], показано на рис. 24 влияние

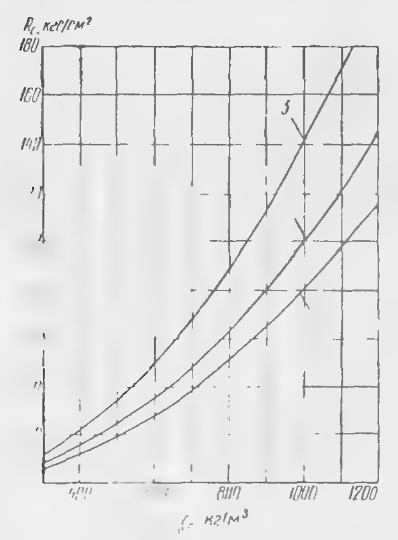


Рис 23 Зависимость кубиковой прочности отечественных ячеистых бетонов R_c от их объемного веса γ_c

1 — $R_c = 80\gamma_c^2$; 2 — $R_c = 100\gamma_c^2$; 3 — $R_c = 140\gamma_c^2$

Рис. 24. Зависимость прочности контрольных ячеистобетонных кубов от величины ребра

1 — по данным ЦНИИСК; 2 — то же, Нуриса; 3 — то же, фирмы «Сипорекс»; 4 — то же, фирмы «Итонг»

влажности на механические свойства ячеистого бетона будет рассмотрено далее.

Призменная прочность. До последнего времени призменную прочность ячеистых бетонов, как и других видов легких и тяжелых бетонов, устанавливали испытанием на сжатие призм размером 15×15×60 или 20×20×80 *см* при влажности образца 8—15% по весу. Эти призмы испытывали по обычной методике, принятой для испытания бетонных призм на сжатие.

В последнее время в связи с введением ГОСТ 12852-67 [25] призменную прочность определяют испытанием на сжатие призм 10×10×30 *см*, высушенных до постоянного веса. Призмы выпиливают из изделия таким образом, чтобы положение их при испытании соответствовало работе изделия в конструкции. Для испытания берут шесть образцов и высушивают их до постоянного веса. Опорные плоскости призм отшлифовывают. После установки призмы центрируют при нагрузке, не превышающей 20% предполагаемой разрушающей, по индикаторам, размещенным по одному на каждой грани призмы. Отклонения показаний отдельных индикаторов не должны отличаться более чем на 10% от среднего значения.

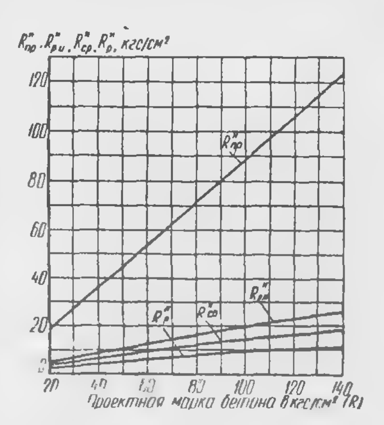


Рис. 25. Зависимость сопротивления отечественных ячеистых бетонов при различных силовых воздействиях от проектной марки бетона

$R^н_{пр}$ — призменная прочность; $R^н_{р.и}$ — сопротивление растяжению при изгибе; $R^н_{ср}$ — сопротивление срезу; $R^н_р$ — сопротивление растяжению

Образец-призму ставят на опорную плиту пресса так, чтобы сжимающая сила была параллельна продольной оси образца-призмы и чтобы вертикальная ось образца проходила через центр опорной плиты пресса. Средний предел прочности призм при сжатии вычисляют так же, как и при определении предела прочности при сжатии ячеистобетонных кубов.

Сравнение результатов испытаний на сжатие призм размером 10×10×30 *см*, высушенных до постоянного веса, с результатами испытаний призм 15×15×60 и 20×20×80 *см* при естественной влажности показало, что коэффициенты призменной прочности

$$K_{п.п} = R^н_{пр.с} : R_c \quad (26)$$

и

$$K'_{п.п} = R^н_{пр} : R \quad (27)$$

практически равны.

Зависимость нормативной средней призменной прочности $R^н_{пр}$ от кубиковой проектной марки бетона R (рис. 25) может быть выражена формулой

$$R^н_{пр} = 0{,}95R - 0{,}0005R^2 \ кгс/см^2. \qquad (28)$$

Величины нормативной призменной прочности для разных марок бетона приведены в табл. 24.

Таблица 24

Нормативная призменная прочность ячеистых бетонов

Показатели	Прочность в *кгс/см²*						
Контрольная характеристика R_c	25	35	50	75	100	150	200
Проектная марка бетона R	15	25	35	50	75	100	150
Нормативная прочность $R^н_{пр}$	14	23,5	32,5	46,5	68,5	90	131
$R^н_{пр}:R_c$	0,56	0,67	0,65	0,62	0,68	0,6	0,65
$R^н_{пр}:R$	0,93	0,94	0,93	0,93	0,91	0,9	0,87

По данным Э. Пуринса [90], коэффициент призменной прочности в среднем равен 0,95, а в ряде случаев близок 1 (рис 26). По данным О. Графа [85], призменная прочность ячеистых бетонов близка к кубиковой и $K_{п.п} = 1$. Согласно Г. Шеффлеру [93], $K_{п.п}$ меняется от 0,8 до 1,2, составляя в среднем 1.

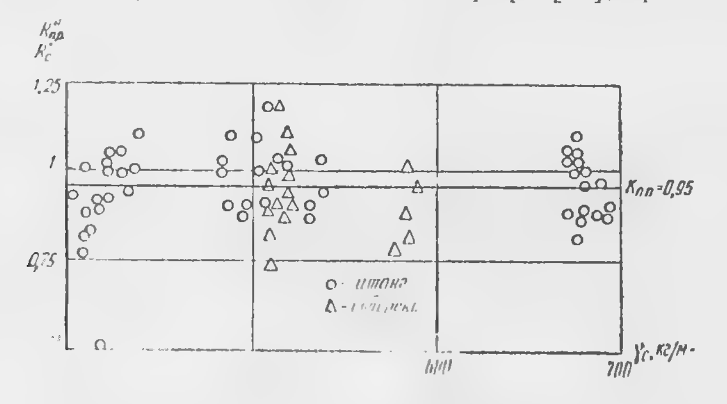


Рис 26. Зависимость $R^н_{пр}$ от кубиковой прочности R_c для ячеистых бетонов объемного веса от 400 до 600 кг/м³

Как видно из приведенных данных, ячеистые бетоны характеризуются высокими коэффициентами призменной прочности.

С о п р о т и в л е н и е я ч е и с т о г о б е т о н а о с е в о м у р а с т я ж е н и ю определяют испытанием либо

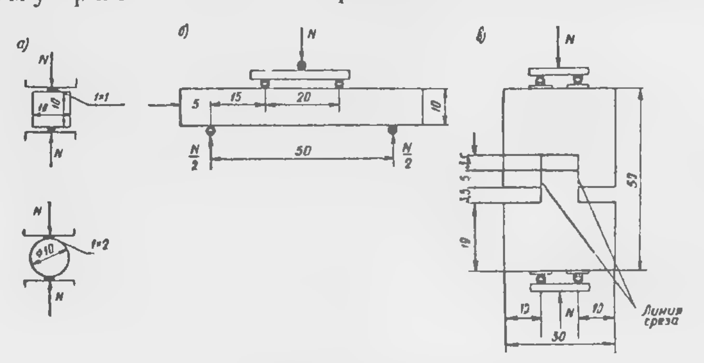


Рис. 27. Схема испытания ячеистых бетонов при различных силовых воздействиях

а — на растяжение при раскалывании, б — на изгиб (размеры даны в см)

призм и восьмерок на растяжение, либо кубов и цилиндров на раскалывание. Для испытания на раскалывание используют гидравлический пресс со шкалой предельных нагрузок 5 и 10 *т*, стальные полоски размером 10×20×110 или 10×10×110 *мм*.

Прочность при растяжении находят из испытаний шести образцов-цилиндров диаметром и высотой 100 *мм* или образцов-кубов с размером ребер 100 *мм*, выпиленных или высверленных из изделия. Опорные грани кубов или образующие цилиндров после выпиливания (высверливания) пришлифовывают и образцы высушивают до постоянного веса. Испытания образцов проводят в положении, соответствующем работе изделий в конструкции. Образец помещают между двумя стальными прокладками, расположенными вдоль линии, соединяющей середины двух противоположных опорных плит пресса, как указано на рис. 27. Давление на образец должно возрастать равномерно со скоростью 2—3 *кгс/см²* в 1 *сек*.

Испытание следует прервать в тот момент, когда образец полностью еще не расколот, но показание на манометре пресса начинает падать.

Предел прочности на осевое растяжение ($R_р^н$) для каждого образца вычисляют по следующим формулам:

при испытании образцов-кубов

$$R_р^н = \frac{2P_{макс}}{\pi a^2}\ кгс/см^2, \tag{29}$$

где $P_{макс}$ — максимальная разрушающая нагрузка в *кгс*; a — длина ребра куба в *см*;

при испытании образцов-цилиндров

$$R_р^н = \frac{2P_{макс}}{\pi dl}\ кгс/см^2, \tag{30}$$

где d — диаметр цилиндра в *см*; l — высота цилиндра в *см*.

Предел прочности при растяжении определяют с точностью до 1 *кгс/см²* как среднее арифметическое из результатов испытания шести образцов. Результаты испытаний отдельных образцов, отличающиеся на ±20% от среднего значения (но не более двух), отбрасывают.

Испытания ячеистых бетонов на растяжение при раскалывании показали, что зависимость между нормативным сопротивлением осевому растяжению $R_р^н$ и проектной маркой бетона R (см. рис. 25) может быть выражена формулой

$$R_р^н = 0{,}15R - 0{,}0005R^2\ \ кгс/см^2. \tag{31}$$

Таблица 25

Нормативное сопротивление ячеистых бетонов осевому растяжению

Показатели	Прочность в *кгс/см²*						
Контрольная характеристика R_c	25	35	50	75	100	150	200
Проектная марка бетона R	15	25	35	50	75	100	150
Нормативное сопротивление $R_р^н$	2	3,4	4,6	6,2	8,4	10	11,2
$R_р^н : R_c$	0,08	0,1	0,09	0,08	0,08	0,07	0,06
$R_р^н$ R	0,13	0,14	0,13	0,12	0,11	0,1	0,08

Величины нормативных сопротивлений ячеистого бетона растяжению $R_р^н$ для разных марок бетона приведены в табл. 25.

По данным [88], сопротивление ячеистых бетонов осевому растяжению в значительной степени зависит от методики испытаний; в среднем для шведских бетонов величина $R_р^н$ составляет 1/6 предела прочности при сжатии R_c.

Э. Пуринс [90] установил, что сопротивление ячеистых бетонов осевому растяжению может быть вычислено по формуле Гранхольма

$$R_р^н = 0{,}63\sqrt[3]{R_c^2}\ \ кгс/см^2. \tag{32}$$

На рис. 28 приведены результаты испытаний шведских ячеистых бетонов на осевое растяжение.

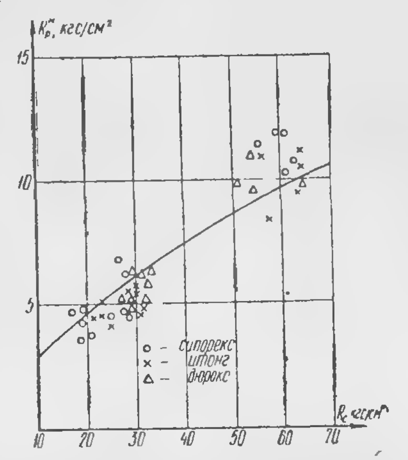


Рис. 28. Зависимость сопротивления растяжению $R_р^н$ от кубиковой прочности R_c для шведских ячеистых бетонов

Сопротивление ячеистого бетона растяжению при изгибе определяют испытанием балок размером 100×100×600 *мм*. Перед испытанием измеряют ширину и высоту образца-балки в середине ее длины с точностью до 1 *мм*. Испытания проводят двумя равными сосредоточенными грузами, располагаемыми симметрично по отношению к опорам; балки опираются на шарнирные опоры, причем одна из опор должна быть подвижной и допускать свободное перемещение балки вдоль оси, а другая — неподвижной (см. рис. 27). Испытания проводят на прессе мощностью до 5 *тс*. Балку укладывают на опоры так, чтобы изгиб ее происходил в плоскости, перпендикулярной направлению заливки ячеистой массы в форму. Скорость загружения не должна превышать 25 *кгс* в 1 *сек*. Предел прочности на растяжение при изгибе вычисляют по формуле

$$R^{н}_{р.и} = \frac{45N_р}{bh^2}\ кгс/см^2, \qquad (33)$$

где $N_р$ — разрушающая нагрузка в *кгс*; b — ширина балки в *см*; h — высота балки в *см*.

Предел прочности ячеистого бетона на растяжение при изгибе вычисляют с точностью до 1 *кгс/см²* как среднее арифметическое из результатов испытания шести образцов. Результаты испытаний, отличающиеся от среднего более чем на ±20% (но не более двух), отбрасывают.

Опытами установлено, что сопротивление ячеистого бетона растяжению при изгибе $R^{н}_{р.и}$ по величине R может быть вычислено по формуле

$$R^{н}_{р.и} = 0{,}25R - 0{,}0005R^2\ кгс/см^2. \qquad (34)$$

Величины нормативных сопротивлений $R^{н}_{р.и}$ для бетонов разных марок приведены в табл. 26.

Таблица 26

Нормативное сопротивление ячеистых бетонов растяжению при изгибе

Показатели	Прочность в *кгс/см²*						
Контрольная характеристика R_c	25	35	50	75	100	150	200
Проектная марка бетона R	15	25	35	50	75	100	150
Нормативная прочность $R^{н}_{р.и}$	3,7	5,9	8,1	11,2	16	20	26,2
$R^{н}_{р.и} : R_c$	0,15	0,17	0,16	0,15	0,16	0,13	0,13
$R^{н}_{р.и} : R$	0,24	0,24	0,23	0,22	0,21	0,2	0,18

Р. Валор [82] на основании опытов О. Графа и других исследователей приходит к выводу, что относительная величина $R^{н}_{р.и} : R_c$ при изменении кубиковой прочности бетона от 35 до 190 *кгс/см²* соответственно меняется от 0,5 до 0,25.

По данным [88], величина сопротивления растяжению при изгибе $R^{н}_{р.и}$ зависит от методики испытаний и в среднем составляет 20% величины кубиковой прочности.

Сопротивление ячеистого бетона срезу определяют испытанием призм размером 300×500×100 *мм* со специальными вырезами. Испытание проводят по схеме, приведенной на рис. 27.

Величину предела прочности ячеистого бетона при срезе вычисляют по формуле

$$R^{н}_{ср} = \frac{N_р}{F}\ кгс/см^2, \qquad (35)$$

где $N_р$ — разрушающая нагрузка в *кгс*; F — сечение среза в *см²*.

Средний предел прочности при срезе вычисляют как среднее арифметическое из результатов испытания шести призм-близнецов. Результаты испытаний отдельных призм, отличающиеся от среднего более чем на ±20% (но не более двух), отбрасывают. Испытания показали, что сопротивление ячеистого бетона срезу по величине марки бетона можно вычислить по формуле

$$R^{н}_{ср} = 0{,}20R - 0{,}0005R^2\ кгс/см^2. \qquad (36)$$

Величины сопротивления ячеистого бетона срезу приведены в табл. 27.

Таблица 27

Нормативное сопротивление ячеистых бетонов срезу

Показатели	Прочность в *кгс/см²*						
Контрольная характеристика R_c	25	35	50	75	100	150	200
Проектная марка бетона R	15	25	35	50	75	100	150
Нормативная прочность $R^{н}_{ср}$	2,9	4,7	6,4	8,8	12,2	15	18,8
$R^{н}_{ср} : R_c$	0,12	0,13	0,13	0,12	0,12	0,1	0,09
$R^{н}_{ср} : R$	0,19	0,19	0,18	0,18	0,16	0,15	0,13

По данным [88], сопротивление ячеистого бетона срезу в значительной мере зависит от методики испытаний. При испытании на чистый срез при помощи круглого штампа с расположением образца на основании, имеющем круглое отверстие, диаметр которого равен диаметру штампа, сопротивление срезу $R^{н}_{ср}$ составляет 25—30% кубиковой прочности. Если же отверстие в основании имеет больший диаметр, чем диаметр штампа, то при испы-

тании на срез выкалывается конус под углом 45° и сопротивление срезу может составлять всего лишь 2—3% кубиковой прочности.

Показатели однородности. В ЦНИИСК и НИИЖБ была произведена статистическая обработка результатов испытаний контрольных образцов-кубов и цилиндров, изготовленных и испытанных на ряде отечественных заводов ячеистых бетонов.

Из данных, приведенных в табл. 28, видно, что коэффициенты изменчивости показателей объемного веса и прочности ячеистых бетонов, изготовляемых на восьми крупных заводах ячеистых бетонов, достаточно велики. По объемному весу коэффициент изменчивости C_γ меняется от 3 до 8%, по прочности — от 14 до 23%.

Показатель однородности по прочности K, приведенный в таблице, вычислен по формуле

$$K = \frac{R_{ср}}{R_с}(1 - 3C_R), \tag{37}$$

где $R_{ср}$ — средняя статистическая кубиковая прочность в $кгс/см^2$;
$R_с$ — заданная данному заводу кубиковая прочность в $кгс/см^2$;
C_R — изменчивость показателей прочности.

Для разных заводов ячеистых бетонов величина K менялась от 0,36 до 0,79, составляя в среднем для заводов, выпускающих бетоны автоклавного твердения, $K=0{,}52$, а для завода, выпускающего безавтоклавный золобетон, $K=0{,}39$.

Таким образом, принятое в нормативных документах значение коэффициента однородности по прочности $K=0{,}45$ — для бетонов автоклавного твердения и $K=0{,}4$ — для бетонов безавтоклавного твердения подтверждается результатами статистической обработки данных испытаний контрольных образцов на действующих заводах ячеистого бетона мощностью 100—200 тыс. $м^3$ в год.

Статистическая обработка результатов испытаний образцов из ячеистых бетонов на растяжение, изгиб и срез показала, что показатели изменчивости ячеистых бетонов при этих воздействиях значительно выше, чем при сжатии, и составляют в среднем $C_R=25\%$. Это обусловило установление величины коэффициента однородности при растяжении, изгибе и срезе, равной 0,25.

Таблица 28

Выборочные данные по однородности газобетона на заводах производительностью 100—200 тыс. $м^3$ в год

Показатели	Ленинградский	Ижевский	Пензенский	Набережно-Челнинский	Барнаульский	Ступинский	Нарвский	Ангарский*
Объем выборки в шт.	318	293	438	218	620	266	252	1800
Заданный объемный вес в $кг/м^3$	600	700	700	700	700	750	700	1200
Средний статистический объемный вес в $кг/м^3$	605	690	775	710	725	770	675	1300
Среднеквадратическое отклонение σ_γ в $кг/м^3$	17	45	36	46	55	59	46	70
Коэффициент изменчивости показателей объемного веса C_γ	0,028	0,065	0,046	0,065	0,076	0,076	0,068	0,054
Заданная кубиковая прочность $R_с$ в $кгс/см^2$	35	50	50	50	50	50	50	50
Средняя статистическая кубиковая прочность $R_{ср}$ в $кгс/см^2$	46	61	59	55	47	58	68	63
Среднеквадратическое отклонение σ_R в $кгс/см^2$	7,6	14,5	11,6	10,7	7,4	13,6	9,9	14,3
Коэффициент изменчивости показателей кубиковой прочности C_R	0,17	0,22	0,19	0,2	0,16	0,23	0,14	0,23
Показатель однородности по прочности $K = \frac{R_{ср}}{R_с}(1-3C_R)$	0,64	0,42	0,51	0,44	0,49	0,36	0,79	0,39

* Завод выпускает безавтоклавный ячеистый бетон.

Деформации бетона при кратковременном действии нагрузки

Методика определения деформации. При кратковременных испытаниях на сжатие призмы из ячеистого бетона влажностью 8—15% загружают ступенями, равными 0,1 ожидаемой разрушающей нагрузки. Под нагрузкой на каждой ступени образец, как правило, выдерживают от 1 до 15 *мин* для распределения давления и снятия отсчетов по приборам. Отсчеты снимают сразу после установления нужной ступени нагрузки и через определенные интервалы времени — от 1 до 15 *мин*.

По этой методике можно установить значения упругих и пластических деформаций бетона на разных ступенях кратковременного загружения (обжатия)

$$\sigma_{\text{обж}}^{\text{к}} = \frac{\sigma_{\text{б}}^{\text{к}}}{R_{\text{пр}}^{\text{н}}},$$

где $\sigma_{\text{б}}^{\text{к}}$ — напряжение в бетоне на данной ступени нагрузки; $R_{\text{пр}}^{\text{н}}$ — призменная прочность (предел прочности при сжатии).

В отдельных случаях опытные образцы нагружают непрерывно до разрушения. При этом длительность испытания призм в зависимости от принятой методики увеличивается от 10—15 *сек* до 2,5 *ч*; графики деформаций ячеистобетонных призм приведены на рис. 29.

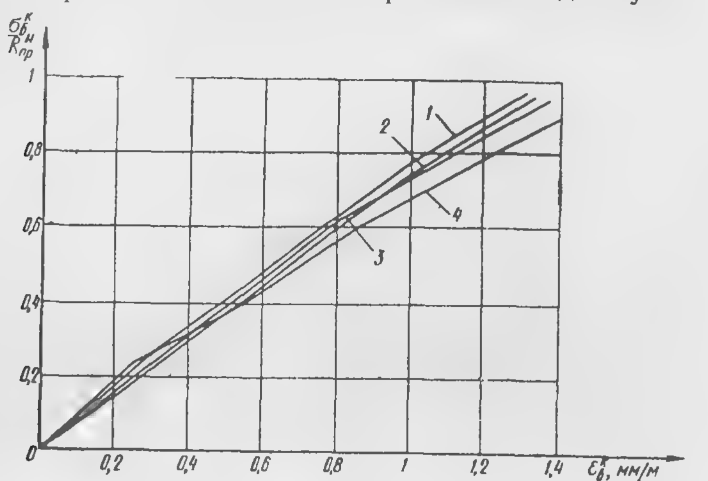


Рис. 29. Продольные деформации сжатия ячеистых бетонов при выдержках

1 — 0 *мин*; 2 — 1 *мин*, 3 — 5 *мин*; 4 — 15 *мин*

Испытания проводятся, как правило, на призмах размером от 10×10×30 до 20×20×80 *см*; за рубежом поперечное сечение призм составляет 7,5×7,5 *см*. До последнего времени призмы испытывали при влажности бетона 8—15%, однако ГОСТ 12852—67 [25] рекомендует для определения деформаций и прочности ячеистых бетонов

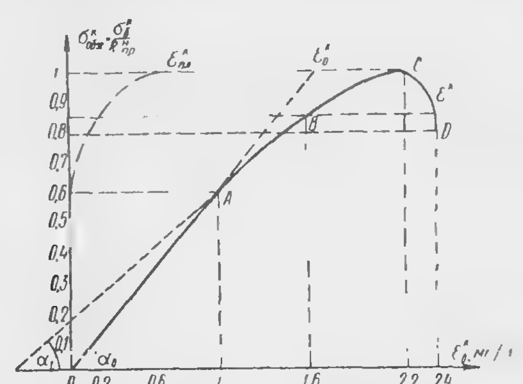


Рис. 30. Диаграмма сжатия ячеистых бетонов

испытывать призмы размером 10×10×30 *см*, высушенные до постоянного веса.

Кроме того, призмы из ячеистого бетона испытывают на сжатие с попеременными нагрузкой и разгрузкой на каждой ступени нагружения. Испытания призм по этой методике позволяют установить остаточные деформации при различных значениях $\sigma_{\text{обж}}^{\text{к}}$ [21].

Деформации образцов из ячеистого бетона при осевом растяжении определяют на призмах сечением от 25 до 100 *см*² или на стандартных восьмерках либо при испытании кубов (или цилиндров) на раскалывание [25, 49, 90].

При испытаниях на сжатие и растяжение деформации измеряют при помощи индикаторов часового типа, тензометров и тензодатчиков.

Продольные деформации сжатия. В результате многочисленных испытаний на сжатие ячеистобетонных призм при кратковременной нагрузке [31, 41, 49, 62, 64, 83, 90] была уточнена диаграмма сжатия ячеистых бетонов (рис. 30).

Из рассмотрения этой диаграммы следует, что до точки A продольные деформации $\varepsilon^к_б = \varepsilon^к_о$ пропорциональны напряжениям $\sigma^к_б$; точка A соответствует пределу упругости ячеистого бетона $\sigma^к_б = 0,6\ R^н_{пр}$; при напряжениях $\sigma^к_б \leqslant 0,6\ R^н_{пр}$ пластические деформации $\varepsilon^к_{пл}$ практически не отмечаются. С повышением напряжения бетона кривая деформаций поднимается вверх до точки B, которой соответствует напряжение бетона $\sigma^к_б = 0,85\ R^н_{пр}$. На участке AB с повышением напряжения деформации $\varepsilon^к_{пл}$ незначительно возрастают, что связано с развитием в бетоне микротрещин; этот участок диаграммы характеризуется линией, угол наклона которой к оси абсцисс меньше угла наклона линии $0A$ $(\alpha_1 < \alpha_0)$.

При дальнейшем повышении напряжения $\sigma^к_б > 0,85 R^н_{пр}$ зависимость между деформациями и напряжениями выражается кривой линией, выпуклой кверху, деформации бетона растут значительно быстрее, чем напряжения. На участке BC наблюдаются значительные деформации, которые связаны с усиленным развитием в бетоне микротрещин, переходящих в макротрещины.

Точка C соответствует наибольшему значению напряжений $\sigma^к_б = R^н_{пр}$. При напряжении, соответствующем точке D, призма полностью разрушается — напряжения в бетоне ниже, чем $R^н_{пр}$. Развитие деформаций на этом участке связано с развитием необратимых макротрещин.

При кратковременных испытаниях призм значения предельных продольных относительных деформаций бетона $\varepsilon^к_б$ соответствуют нагрузкам, близким к разрушающим. Величина их колеблется в значительных пределах — от 0,9 до 3 *мм/м*. Установить четкую зависимость между кубиковой прочностью ячеистого бетона и его предельными деформациями ввиду большого разброса результатов испытаний не удалось.

Опыты показали, что наибольшие предельные деформации отмечаются в бетонах на известковом вяжущем, а наименьшие — на цементном и шлаковом.

На основании проведенных исследований зависимость между относительными напряжениями $\sigma^к_{обж} = \sigma^к_б : R^н_{пр}$ и относительными деформациями сжатия $\varepsilon^к_б$ может быть выражена формулой вида:

$$\sigma^к_{обж} = a\varepsilon^к_б - b(\varepsilon^к_б)^2, \qquad (38)$$

где a и b — постоянные величины, зависящие от вида ячеистого бетона, показателей его прочности и объемного веса.

На рис. 31 в качестве примера приведен график продольных деформаций сжатия шведских ячеистых бетонов, по данным испытаний А. Т. Дворядкина [31] и Э. Пуринса [90], которые весьма близки к диаграмме, изображенной на рис. 30.

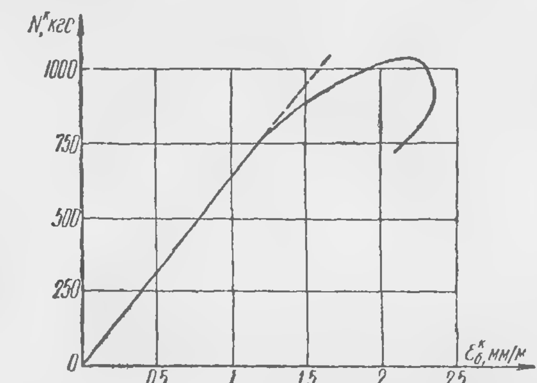


Рис. 31. Продольные деформации сжатия шведского газобетона при влажности 7%

Момент появления первых микротрещин, невидимых на поверхности бетонного образца, может быть зафиксирован при помощи ультразвука. Такие исследования проводились на образцах из ячеистого бетона Г. А. Тетерсом [76], К. И. Бахтияровым [7] и др.

Испытания Г. А. Тетерса показали, что при нагрузке, равной примерно 0,5 разрушающей, скорость прохождения ультразвука через газобетонный образец, испытываемый на сжатие, начинает падать, что свидетельствует о нарушении структуры газобетона и появлении в нем микротрещин.

На рис. 32 приведены графики деформаций газобетонных призм, которые были испытаны по методике, предусматривавшей разгрузку призмы на каждой ступени предварительного нагружения. Разгрузку производили до начальной нагрузки, соответствовавшей напряжению $\sigma^к_б \approx 0,055\ R^н_{пр}$, аналогично с рекомендациями Временной инструкции [21]. Из графика видно, как меняются упругие, пластические и остаточные деформации ячеистого бетона при испытании на сжатие со сбросом нагрузки.

Поперечные деформации растяжения при сжатии. При испытании бетонных призм на одно-

осное сжатие измеряют не только продольные, но и поперечные деформации. По величине этих деформаций можно судить о пластических свойствах бетона, а также определить момент появления в нем первых трещин.

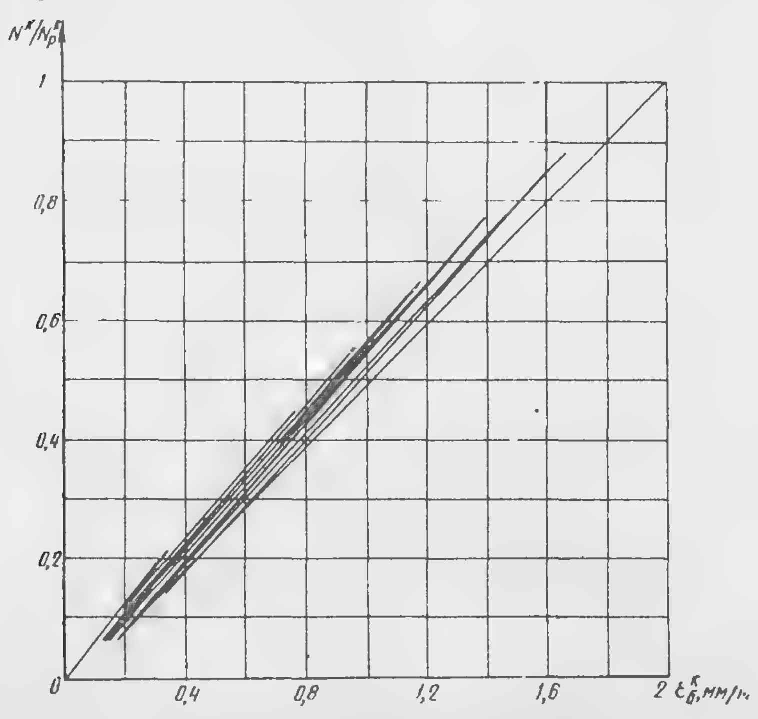


Рис. 32. Продольные деформации ячеистых бетонов при попеременном нагружении и разгружении

Поперечные относительные деформации характеризуются коэффициентами μ и ν:

$$\mu = \frac{\varepsilon^к_{б.п}}{\varepsilon^к_б}, \tag{39}$$

где $\varepsilon^к_{б.п}$ — поперечные полные относительные деформации; $\varepsilon^к_б$ — продольные полные относительные деформации;

$$\nu = \frac{\Delta\varepsilon^к_{б.п}}{\Delta\varepsilon^к_б}, \tag{40}$$

где $\Delta\varepsilon^к_{б.п}$ — приращение полных поперечных деформаций; $\Delta\varepsilon^к_б$ — то же, продольных деформаций.

По величине коэффициента ν О. Я. Берг [9] определяет начальный момент появления микротрещин в тяжелом бетоне. В этом бетоне образование микротрещин наблюдается в тех случаях, когда $\nu > 0{,}5$, что следует из равенства, которое характеризует относительное изменение единичного объема ΔV твердого тела при осевом сжатии:

$$\Delta V = \varepsilon^к_б (2\nu - 1). \tag{41}$$

Если $\nu < 0{,}5$, объем образца уменьшается $\Delta V < 0$, если $\nu = 0{,}5$, он не меняется $\Delta V = 0$, если $\nu > 0{,}5$, объем образца увеличивается $\Delta V > 0$.

Для тяжелых бетонов к моменту обнаружения разрывов величина относительной поперечной деформации составляла в среднем $\varepsilon^к_{б.п} = 0{,}1$ *мм/м*, что соответствует средним величинам предельной деформации тяжелого бетона при осевом растяжении.

Дальнейшие исследования показали, что процесс появления микротрещин нельзя представлять мгновенным при достижении значения ν более 0,5. Для тяжелого бетона различают верхнюю условную границу микротрещин и нижнюю границу микроразрушений [10]. При многочисленных испытаниях призм из ячеистых бетонов на одноосное сжатие первые видимые трещины на их поверхности наблюдались при напряжении $\sigma^к_б = (0{,}8 \div 1)\ R^н_{пр}$. Однако потрескивание, свидетельствующее о появлении невидимых микротрещин, отмечалось и при напряжениях $\sigma^к_б \leqslant 0{,}5\ R^н_{пр}$ [76].

Исследования поперечных деформаций, выполненные для различных видов ячеистых бетонов, показали, что при напряжении $\sigma^к_б \leqslant 0{,}5\ R^н_{пр}$ коэффициент поперечных деформаций μ меняется незначительно от 0,18 до 0,22, составляя в среднем 0,2, что и принято в нормативных документах.

Представляют интерес исследования поперечных деформаций, выполненные Э. Пуринсом [90] в Швеции. График зависимости $\varepsilon^к_{б.п}$ от $N^к$ (действующей нагрузки) для ячеистых бетонов приведен на рис. 33. Из него видно, что при действии сжимающей нагрузки диаграмма поперечных деформаций газобетона аналогична диаграмме продольных.

Попытка оценить момент появления первых микротрещин в ячеистом бетоне при помощи коэффициентов μ и ν, как это было сделано для тяжелого бетона, не увенчалась успехом.

Графики продольных и поперечных деформаций ячеистых бетонов [51] приведены на рис. 34, а характеристики μ, ν и ΔV — на рис. 35.

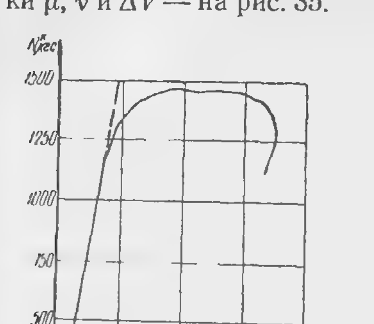


Рис. 33. Поперечные деформации шведских ячеистых бетонов

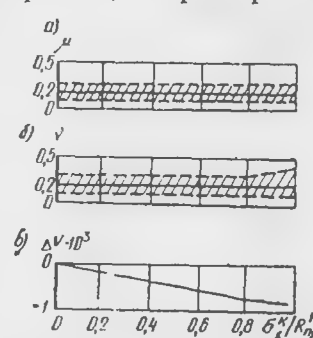


Рис. 35. Изменение характеристик поперечных деформаций ячеистых бетонов

$а - \mu = \frac{\varepsilon_п}{\varepsilon_{пр}}$; $б - \nu = \frac{\Delta\varepsilon_п}{\Delta\varepsilon_{пр}}$; $в - \Delta V$

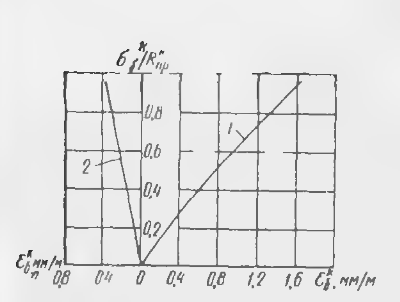


Рис. 34. Продольные *1* и поперечные *2* деформации ячеистых бетонов

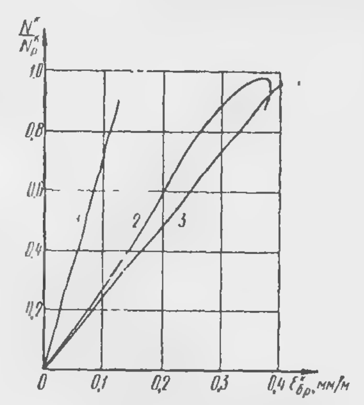


Рис. 36. Продольные деформации ячеистых бетонов при осевом растяжении

1, 3 — по данным ЦНИИСК; *2* — по данным Э. Пуринса

Исследования поперечных деформаций ячеистого бетона, проведенные в ЦНИИСК [41], НИИЖБ [51] и ЦНИИСМ ВНР [83], позволили сделать вывод, что коэффициенты μ и ν, а также характер их изменения с повышением напряжения $\sigma_б^к$ значительно отличаются от аналогичных характеристик, полученных для обычного тяжелого бетона. Очевидно, это объясняется тем, что ячеистый бетон — пористый материал, в межпоровых стенках которого имеются микротрещины. При его сжатии продольные деформации могут развиваться за счет уплотнения материала, закрытия микротрещин, а также вследствие разрушения межпоровых стенок. Однако увеличения поперечных размеров (объема) образца даже при напряжениях, близких к пределу прочности бетона, не наблюдается.

Способ, позволяющий определить момент появления микротрещин в ячеистом бетоне путем измерения скорости распространения ультразвука, требует дополнительной опытной проверки, так как не всегда удается получить положительный результат.

В итоге проведенных исследований были измерены поперечные деформации растяжения $\varepsilon_{б.п}^к$ для различных видов ячеистых бетонов. Для отечественных ячеистых бетонов объемного веса 700—1200 *кг/м³* на цементном и шлаковом вяжущем при напряжении $\sigma_б^к = 0{,}5\,R_{пр}^н$ поперечные деформации составили в среднем 0,14 *мм/м*, а для бетонов на известковом вяжущем — 0,23 *мм/м*; при напряжениях, близких к пределу прочности, $\sigma_б^к = 0{,}9\,R_{пр}^н$, поперечные деформации ячеистых бетонов на цементном и шлаковом вяжущем составили в среднем 0,3 *мм/м*, для бетонов на известковом вяжущем — 0,55 *мм/м*. Для шведских ячеистых бетонов на цементе (сипорекс на песке) $\gamma_c = 400 \div 650$ *кг/м³* при $\sigma_б^к = 0{,}5\,R_{пр}^н$ поперечные деформации составили в среднем 0,35 *мм/м*, а при $\sigma_б^к = R_{пр}^н$ —0,74 *мм/м*. Для шведских ячеистых бетонов на извести $\gamma_c = 650$ *кг/м³* (итонг белый и голубой) поперечные деформации при $\sigma_б^к = R_{пр}^н$ в среднем были равны 0,83 *мм/м*. Для венгерских ячеистых бетонов на извести $\gamma_c = 900 \div 1000$ *кг/м³* при $\sigma_б^к = 0{,}5\,R_{пр}^н$ поперечные деформации были в среднем равны 0,18 *мм/м*, а при $\sigma_б^к = R_{пр}^н$ —0,5 *мм/м*.

Продольные деформации растяжения.

Исследования напряженного состояния тяжелого бетона при одноосном сжатии [9] показали, что сопротивление его отрыву играет основную роль в оценке прочности бетона. Поэтому изучение сопротивления отрыву, которое в основном определяется в опытах на одноосное растяжение, и установление деформаций $\varepsilon^{к}_{б.р}$, развивающихся при испытании на растяжение, представляют значительный интерес.

Опытных данных по исследованию сопротивления ячеистых бетонов осевому растяжению сравнительно немного. Деформации ячеистых бетонов при осевом растяжении были исследованы в ЦНИИСК [41] и в Институте строительной техники в Гетеборге [31, 90]. Графики деформаций ячеистобетонных призм, по данным различных исследователей, приведены на рис. 36.

Опыты показали, что предельная растяжимость отечественных ячеистых бетонов при $\sigma^{к}_{б.р} = 0{,}8\ R^{н}_{р}$ колеблется от 0,12 до 0,33 *мм/м*.

Предельные деформации при растяжении для отдельных видов шведского ячеистого бетона в среднем изменялись от 0,35 до 0,43 *мм/м*, а для некоторых образцов они колебались от 0,27 до 0,51 *мм/м*.

Сравнение предельных деформаций разрыва ячеистого бетона с предельными поперечными деформациями при осевом сжатии показало, что при напряжении $\sigma^{к}_{б} \geqslant 0{,}5R^{н}_{пр}$ поперечные деформации сжатых призм близки по своей величине к значениям предельных деформаций растяжения, полученных при осевом растяжении.

Начальный модуль деформации при сжатии. Значения начального модуля деформаций (упругости) ячеистых бетонов $E^{к}_{б}$ используют для расчета жесткости изгибаемых ячеистобетонных элементов конструкций, а также для вычисления деформаций сжатых элементов. Обычно начальный модуль деформаций определяют испытанием призм на сжатие по диаграмме сжатия $\sigma^{к}_{б} - \varepsilon^{к}_{б}$, которая подробно рассмотрена выше.

Многочисленные исследования деформативности ячеистых бетонов при сжатии показали, что их модуль деформаций зависит от объемного веса и прочности на сжатие.

Для определения модуля деформаций ячеистых бетонов выведен целый ряд эмпирических формул. Их анализу посвящено большое количество отечественных и зарубежных исследований [7, 49, 61, 90, 91]. Численные значения модуля деформаций, определенные по различным формулам, сравнивать трудно, так как они выведены по результатам испытания образцов из различных ячеистых бетонов и, кроме того, опытные образцы имели различные размеры и влажность.

Формулы для определения модуля деформаций можно разделить на три группы:

формулы, в которых модуль деформаций представлен как функция прочности бетона при сжатии,

$$E^{к}_{б} = kR^{n}\ кгс/см^{2}, \qquad (42)$$

где k — эмпирический коэффициент, R — предел прочности при сжатии ($R_{с}$ или $R^{н}_{пр}$); n — показатель степени, $n = 0{,}5 \div 1$;

формулы, в которых модуль деформаций представлен как функция объемного веса

$$E^{к}_{б} = k\gamma^{n}_{с}\ кгс/см^{2}; \qquad (43)$$

формулы, в которых модуль деформаций представлен в зависимости от прочности и объемного веса.

По данным наших исследований отечественных ячеистых бетонов, модуль деформаций $E^{к}_{б}$ вполне удовлетворительно может быть определен по формуле

$$E^{к}_{б} = k\gamma_{с}\sqrt{R^{н}_{пр}}\ кгс/см^{2}. \qquad (44)$$

Величина k равна 4 для безавтоклавных ячеистых бетонов, 5 — для бесцементных автоклавных ячеистых бетонов и 6 — для автоклавных цементных бетонов.

Для определения $E^{к}_{б}$ зарубежных ячеистых бетонов можно привести формулу Э. Пуринса [64], выведенную на основании многочисленных испытаний призм:

$$E^{к}_{б} = k\sqrt{R^{н}_{пр}}\ кгс/см^{2}. \qquad (45)$$

Величина k для различных видов ячеистого бетона меняется от 2000 до 4000.

Значения модулей деформаций, определенные на образцах-призмах размером 20×20×80 *см*, приведены в табл. 29. Величина $E^{к}_{б}$ в этой таблице вычислена по формуле

$$E^{к}_{б} = \sigma^{к}_{б} : \varepsilon^{к}_{б}, \qquad (46)$$

где $\sigma^{к}_{б} = 0{,}2\ R^{н}_{пр}$ и $\varepsilon^{к}_{б}$ — относительные деформации при этом напряжении.

Таблица 29

Зависимость начального модуля деформаций $E_б^к$ от вида и марки ячеистого бетона

Ячеистый бетон	$E_б^к$ при R, кгс/см²						
	15	25	35	50	75	100	150
Автоклавный на цементном вяжущем . .	12 000	17 000	25 000	38 000	50 000	75 000	100 000
Автоклавный на бесцементном вяжущем и безавтоклавный на цементном вяжущем	10 000	14 000	20 000	30 000	40 000	60 000	80 000

Модуль деформаций при растяжении. Исследования модуля деформаций ячеистых бетонов при растяжении проводили как в Советском Союзе [41], так и за рубежом [64, 90]. Как установлено проведенными исследованиями, модуль деформаций ячеистых бетонов при осевом растяжении $E_{б.р}^к$ в среднем на 20—40% выше модуля деформаций при сжатии $E_б^к$ при одинаковом объемном весе и прочности.

Прочность и деформации ячеистых бетонов при различной влажности. Прочность ячеистых бетонов при сжатии, растяжении, изгибе и срезе зависит от свободного содержания в них влаги. С уменьшением количества воды прочность повышается. Зависимость между прочностью при сжатии R_w и содержанием влаги W (рис. 37) выражается следующими формулами [41, 89]:

$$R_w = R_c (0{,}001\, W^2 - 0{,}04\, W + 1); \qquad (47)$$

$$R_w = R_c \left(1 - 0{,}038 \sqrt[3]{W^2} + g\right), \qquad (48)$$

где $g = 0{,}03$ для цементных и $g = +0{,}04$ для известковых бетонов.

Влияние влажности ячеистых бетонов на прочность при сжатии, по данным Э. Пуриса [90], показано на рис. 38.

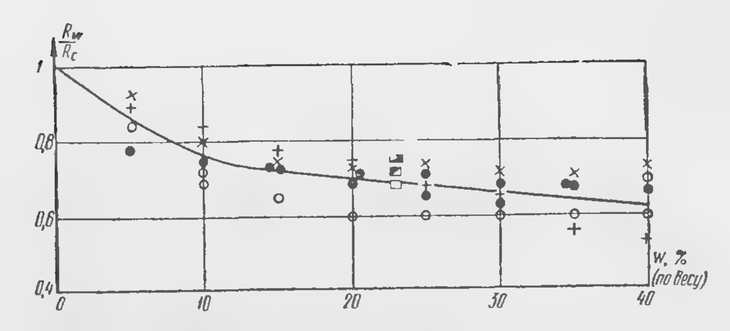


Рис. 37. Влияние влажности на прочность при сжатии отечественных ячеистых бетонов объемного веса от 400 до 1200 кг/м³

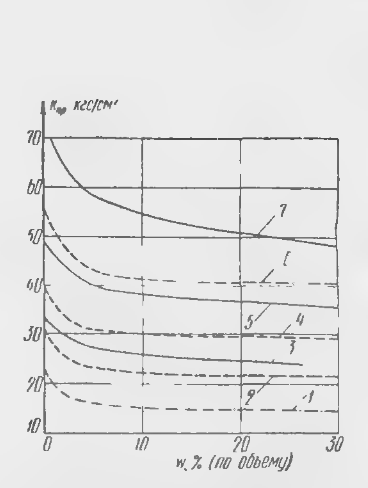


Рис. 38. Влияние влажности на прочность при сжатии шведских ячеистых бетонов

1 — фирмы «Сипорекс» на цементе и песке γ=500 кг/м³; 2, 4, 6 — то же, на шлаке, γ=400; 500 и 650 кг/м³; 3, 5, 7 — фирмы «Итонг» на извести и песке γ=400, 500 и 650 кг/м³

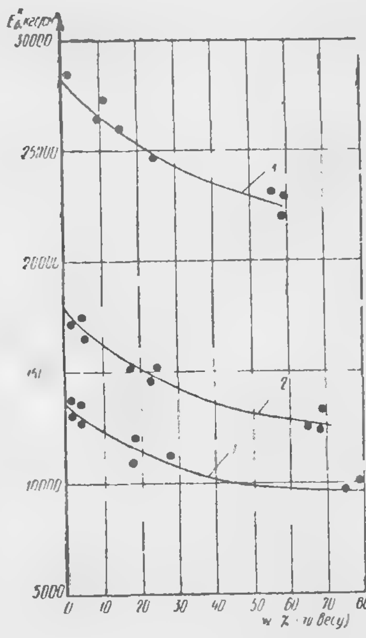


Рис. 39. Влияние влажности на модуль деформаций отечественных ячеистых бетонов

1, 2, 3 — объемный вес бетона соответственно 500, 600 и 700 кг/м³

При определении прочности на сжатие влажного ячеистого бетона рекомендуется вводить понижающие поправочные коэффициенты (табл. 30) для расчета сжатых элементов. В порядке первого приближения можно распространить их также на расчет при растяжении, изгибе и срезе.

Таблица 30

Значения K_w при различной влажности

Влажность W в % по весу	0	5	8	10	15	20	25 и более
Поправочные коэффициенты K_w	1	0,9	0,84	0,8	0,75	0,7	0,65

При промежуточных значениях влажности поправочные коэффициенты определяют интерполяцией. Расчетные значения влажности ячеистых бетонов для ограждающих конструкций (стен, перекрытий и покрытий) приведены ранее. Коэффициент размягчения ячеистого бетона после насыщения его водой равен 0,7—0,8 для цементных и 0,5—0,6 для других видов ячеистых бетонов.

Выше отмечалось, что деформации и модули деформаций ячеистых бетонов в ряде случаев определяют на высушенных образцах, однако известно, что в процессе эксплуатации конструкции работают при определенной влажности. Поэтому необходимо установить влияние влажности на деформации и модуль деформаций ячеистого бетона. Такие исследования были проведены в Советском Союзе [33, 35], а также за рубежом [31, 81, 90].

По данным В. П. Клодченко [33], модуль деформаций отечественных ячеистых бетонов с увеличением влажности уменьшается, что отчетливо видно из рис. 39.

В опытах Э. Пуринса установлено влияние влажности на деформации бетона. Наибольшие предельные деформации имеют бетоны в высушенном состоянии. Увеличение влажности бетона до полного насыщения снижает его предельные деформации в среднем на 10—20%.

Модуль деформаций ячеистого бетона с увеличением влажности уменьшается. В качестве примера на рис. 40 приведены графики изменения модуля деформаций шведских ячеистых бетонов с увеличением их влажности. Из этих графиков следует, что сухой материал обладает наиболее высоким модулем деформаций. С увеличением влажности модуль деформаций резко снижается; особенно ощутимо это снижение при возрастании влажности до 2—3% (по объему). При дальнейшем увеличении влажности модуль деформаций ячеистого бетона на цементном вяжущем практически не меняется. Кривые модуля деформаций ячеистого бетона на извести продолжают снижаться даже при влажности, превышающей 2—3% по объему. Общее снижение модуля деформаций при переходе от сухого бетона к насыщенному водой меняется для отдельных видов бетона в среднем в пределах от 10 до 20%.

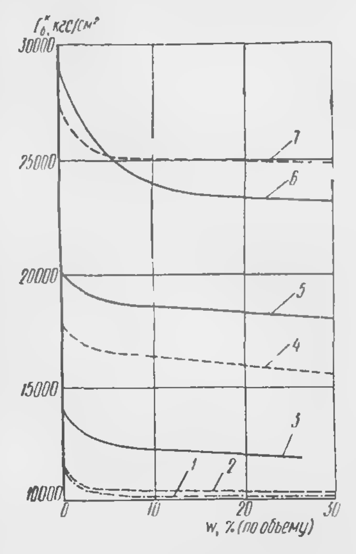


Рис. 40. Влияние влажности на модуль деформаций шведских ячеистых бетонов

1—7 — ячеистые бетоны объемным весом 400—650 кг/м³. Обозначения кривых те же, что и на рис. 38

Исследования показали, что небольшое увеличение влажности бетона (от 2 до 3%) резко снижает его прочность на сжатие; это снижение составляет 60—80% общего снижения прочности на сжатие, наблюдаемого при переходе от сухого бетона к насыщенному водой. При переходе от прочности сухих образцов к прочности водонасыщенных отмечается общее снижение прочности ячеистого бетона на сжатие от 20 до 50%. Разность в прочности сухих и влажных материалов обычно объясняют изменениями в цементном геле ячеистого бетона, насыщенного водой.

Английские исследователи Бесси и Дилнот [81] считают, что основное влияние на прочностные характеристики ячеистого бетона оказывает вода, заполняющая гелевые поры; вода, заполняющая макропоры, на прочность при сжатии влияет незначительно. Снижение прочности на сжатие объясняется ослаблением цементного геля при адсорбции им воды.

Исследования [33, 35, 90] показали, что с увеличением влажности ячеистого бетона снижаются его прочность и деформации, однако прочность снижается в большей степени, что и приводит к уменьшению его модуля де-

формаций. Поэтому понижающие коэффициенты K_w следует учитывать при назначении не только прочностных, но и деформативных характеристик ячеистых бетонов.

Большие исследования по определению прочностных и деформативных свойств газосиликата при действии повышенной влажности выполнены Ю. В. Кореневым, который установил влияние влажности на прочность и деформации газосиликатов (при различных силовых воздействиях) [35].

Прочность и деформации бетона при длительном действии сжимающей нагрузки

Методика испытаний. Элементы из автоклавных ячеистых бетонов широко применяют для наружных и внутренних стен, а также покрытий. Эти конструкции подвергаются длительному действию нагрузки, поэтому исследования возникающих деформаций и прочности ячеистых бетонов представляют не только научный, но и практический интерес. Ниже приводятся результаты испытаний, выполненных в ЦНИИСК и НИИЖБ Госстроя СССР и в ряде других организаций.

Прочность и деформации ячеистых бетонов при длительном действии нагрузок исследованы в значительно меньшей степени, чем при кратковременных. Данные по длительным испытаниям ячеистых бетонов объемного веса от 500 до 1200 *кг/м³* с кубиковой прочностью (контрольной характеристикой) от 25 до 250 *кгс/см²* приведены в работах [42, 49].

Испытания ячеистобетонных призм размерами 15×15×60 и 20×20×80 *см* проводили по следующей методике. Опытные образцы испытывали по сериям. Каждая серия состояла из трех групп призм:

I группа — эталонные, испытывавшиеся в прессе при действии кратковременной нагрузки для определения призменной прочности $R^{э}_{пр}$ перед началом испытаний при длительной нагрузке;

II группа — основные, для определения $R^{о}_{пр}$, испытывавшиеся в пружинных установках при длительной нагрузке (относительном длительном напряжении $\sigma^{д}_{обж} = \sigma^{д}_{б} : R^{н}_{пр}$) от 0,2 до 0,85 ожидаемой разрушающей ($\sigma^{д}_{б}$ — постоянное длительное напряжение в бетоне);

III группа — контрольные, для определения $R^{к}_{пр}$, на

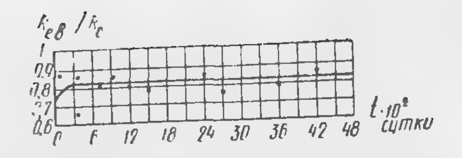


Рис. 41. Изменение кубиковой прочности ячеистых бетонов во времени

которых измеряли температурные и усадочные деформации во времени.

При испытаниях деформации основных и контрольных призм измеряли периодически через 1, 3, 5, 10, 15 и 30 суток, а затем один раз в месяц.

Изменение кубиковой и призменной прочности во времени. В ЦНИИСК и НИИЖБ были проведены испытания на сжатие контрольных кубов с ребром 10 *см* из автоклавных ячеистых бетонов на цементном и шлаковом вяжущих. Объемный вес бетона в сухом состоянии $\gamma_с = 1000 \div 1100$ *кг/м³*, кубиковая прочность $R_с = 100 \div 150$ *кгс/см²*. Кубы хранили в лаборатории при температуре 18—22° С и относительной влажности воздуха 40—60%; испытывали на сжатие по три куба-близнеца при естественной влажности через 10, 20, 30, 60, 90, 180, 360 суток и далее через 1—3 года. В результате испытаний устанавливали кубиковую прочность ячеистого бетона в сухом состоянии $R_с$ в возрасте до 30 суток и при естественной влажности $R_{е.в}$ в различном возрасте.

Средние опытные данные испытаний кубов приведены на рис. 41.

В течение первых трех месяцев кубиковая прочность увеличивается в среднем примерно на 25%, при этом влажность кубов из ячеистого бетона уменьшается с 15—20 (по весу) до 8—10%. После стабилизации влажности в пределах 8—10% кубиковая прочность практически не меняется в течение 15 лет.

Кроме контрольных кубов испытывали эталонные и контрольные призмы при кратковременном сжатии и определяли коэффициенты призменной прочности $K_{п.п} = R^{н}_{пр} : R_с$. Ячеистобетонные призмы были испытаны на сжатие в возрасте от 15 суток до 6,5 лет. Испытания показали, что коэффициенты призменной прочности образцов, испытанных как в возрасте 15—30 суток, так и более 6 лет, оказались практически одинаковыми: $K_{п.п} = R^{н}_{пр} : R_с = 0{,}7$.

Таким образом, у эталонных и контрольных призм, выдержанных в лабораторных условиях без нагрузки в течение 6,5 лет, уменьшения прочности практически не произошло.

Изменение модуля деформаций. По деформациям призм $\varepsilon_б^к$, измеренным при напряжении $\sigma_б^к = 0{,}2R_{пр}$, были вычислены начальные модули деформаций (упругости) бетона: $E_б = \sigma_б^к : \varepsilon_б^к$.

Сравнение начальных модулей деформаций, полученных при кратковременном действии нагрузок в прессе эталонных $E_б^э$, основных $E_б^о$ и контрольных $E_б^к$ призм, находившихся 5—6 лет под длительным обжатием $\sigma_{обж}^д < 0{,}4$, показало, что они близки по величине: $E_б^э = E_б^к = E_б^о$.

К аналогичному выводу о постоянстве модуля упругости автоклавного газосиликата пришли В. И. Скатынский и Ю. В. Крумелис [73].

Однако начальные модули деформации $E_б^о$ основных призм, загруженных 5—6 лет нагрузкой $\sigma_{обж}^д \geqslant 0{,}4$, меньше начальных модулей деформаций эталонных и контрольных призм.

Снижение начального модуля деформаций длительно загруженных основных призм, видимо, было вызвано развитием в них микротрещин. Наличие же микротрещин может привести не только к снижению прочности при сжатии ячеистого бетона, но и к значительному повышению его деформативности.

Длительная прочность ячеистого бетона определяется максимальным напряжением $\sigma_б^д$, которое может воспринять бетон при длительном действии статической нагрузки.

В опытах ЦНИИСК длительную прочность ячеистого бетона устанавливали по величине обжатия основных призм $\sigma_б^д$, при котором они разрушались в пружинных установках. Для оценки длительной прочности ячеистобетонных призм введен коэффициент длительной прочности $m_{дл} = \sigma_б^д : R_{пр}^э$.

Основные призмы, изготовленные из различных видов ячеистого бетона, испытывали при обжатии $0{,}2 \leqslant \sigma_{обж}^д \leqslant 0{,}85$. Опыты показали, что при обжатии $0{,}2 \leqslant \sigma_{обж}^д \leqslant 0{,}5$ не было случаев разрушения их в течение 5—6 лет.

Длительные испытания основных призм, обжатых нагрузкой $0{,}5 < \sigma_{обж}^д < 0{,}85$, показали, что с течением времени их несущая способность может снижаться; в некоторых призмах появились микро- и макротрещины, а часть призм разрушилась.

Из результатов испытаний призм [42] следует, что для призм, загруженных $\sigma_{обж}^д$ 0,5 в течение 5—6 лет, коэффициент длительной прочности $m_{дл} = 1$. Для призм, загруженных при нагрузках $0{,}6 < \sigma_{обж}^д \leqslant 0{,}85$, $m_{дл}$ ячеистых бетонов на цементном вяжущем близок к 0,7, а на известковом — к 0,6.

Учитывая большой разброс показателей прочности, нельзя считать, что значения длительного обжатия $\sigma_{обж}^д$ достаточно точно установлены, поэтому значения $m_{дл}$ подлежат уточнению.

Деформации при длительном действии сжимающей нагрузки. Автоклавный ячеистый бетон характеризуется тем, что межпоровые стенки выполнены из цементирующих новообразований, обладающих сравнительно малой ползучестью. Однако, несмотря на это, ячеистый бетон является упруго-пластическим материалом. Деформации его во времени развиваются частично вследствие деформаций ползучести гелевой составляющей, что, как правило, наблюдается даже при малых напряжениях, а также из-за развития микротрещин в межпоровых стенках, отмечаемого при высоких длительных напряжениях.

При исследованиях основные призмы загружают на начальной стадии нагрузкой $\sigma_{обж}^д$, при этом измеряют начальные деформации ε_0. В дальнейшем на этих же призмах, загруженных постоянной нагрузкой $\sigma_{обж}^д$, измеряют длительные деформации $\varepsilon_{дл}$ во времени. На контрольных призмах измеряют усадочные деформации $\varepsilon_{ус}$. Деформации ползучести $\varepsilon_{пл}$ получают на основании экспериментальных данных: $\varepsilon_{пл} = \varepsilon_{дл} - \varepsilon_{ус}$.

Для количественной оценки ползучести автоклавных ячеистых бетонов можно воспользоваться основными характеристиками, принятыми для оценки ползучести обычного бетона, — характеристикой ползучести $\varphi_t = \varepsilon_{пл} : \varepsilon_0$ и мерой ползучести $C_t = \varepsilon_{пл} : \sigma_б^д$.

Испытания на длительное действие нагрузки были проведены в ЦНИИСК и НИИЖБ. Графики изменения температуры и относительной влажности воздуха в пери-

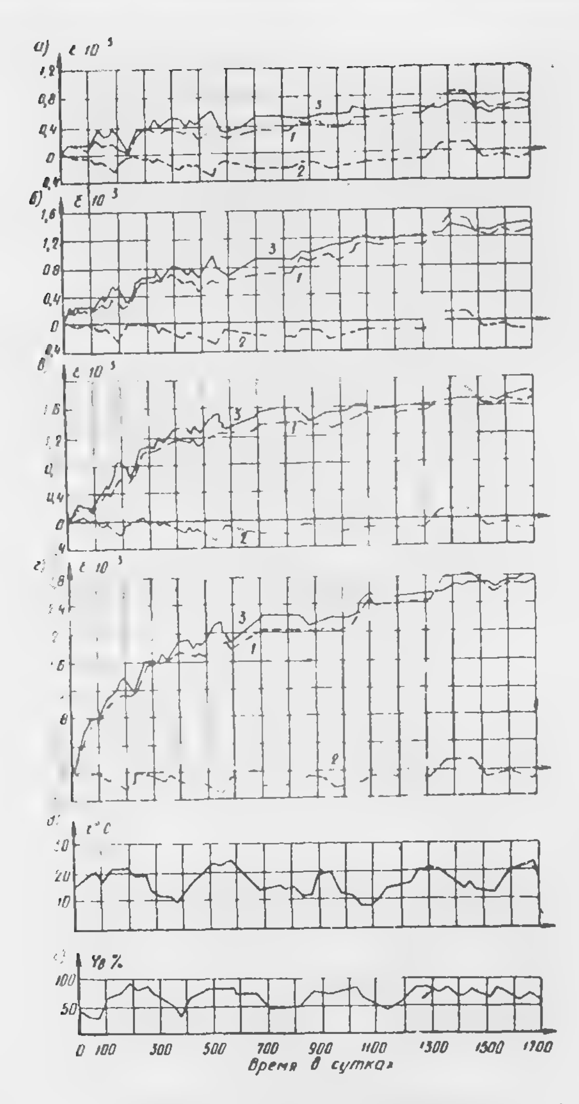


Рис 42. Изменение деформаций ползучести ячеистых бетонов

а — $\sigma^{д}_{обж}=0,3$; *б* — $\sigma^{д}_{обж}=0,5$; *в* — $\sigma^{д}_{обж}=0,57$; *г* — $\sigma^{д}_{обж}=0,7$; *д* — график изменения температуры; *е* — график изменения относительной влажности воздуха φ помещений; *1* — полные деформации; *2* — деформации усадки; *3* — деформации ползучести

од проведения испытаний показаны на рис. 42. Здесь же даны характерные кривые изменения деформаций ячеистых бетонов во времени.

При длительном нагружении ячеистобетонных призм нагрузками $\sigma^{д}_{обж} < 0,3$ деформации ползучести имеют затухающий во времени характер; через 2—3 года рост этих деформаций практически прекращается. При этом напряжении зависимость между деформациями ползучести $\varepsilon_{пл}$ при длительном действии нагрузки $\sigma^{д}_{б}$ близка к линейной; практически ползучесть автоклавных ячеистых бетонов при таком напряжении можно считать линейной.

При длительном загружении призм нагрузками $0,3 < \sigma^{д}_{обж} \leq 0,6$ деформации ползучести слабо затухают во времени.

При длительном загружении призм нагрузками $\sigma^{д}_{обж} > 0,6$ деформации ползучести не затухают во времени. При обжатии $\sigma^{д}_{обж} > 0,3$ ползучесть автоклавных ячеистых бетонов нелинейна.

Как уже отмечалось, ползучесть автоклавных ячеистых бетонов может быть объяснена частично вязким течением геля, а также развитием в межпоровых стенках микротрещин вследствие концентрации в них напряжений. При высоких напряжениях развитие микротрещин протекает более интенсивно: они превращаются в макротрещины. В этом и заключается причина развития незатухающих деформаций ползучести в ячеистых бетонах, которые со временем приводят к разрушению сжатых ячеистобетонных элементов.

При линейной ползучести, когда деформации $\varepsilon_{пл}$ затухают во времени, зависимость деформаций ползучести за время действия длительной нагрузки $(t-t_m)$, по данным ЦНИИСК, может быть выражена известной формулой

$$\varepsilon_{пл} = \sigma^{д}_{б} C_t \left[1 - e^{-m(t-t_m)^{1/k}}\right], \qquad (49)$$

где $\sigma^{д}_{б}$ — постоянное длительное напряжение в бетоне в *кгс/см²*; C_t — предельная мера ползучести бетона в *см²/кгс*, зависящая от вида ячеистого бетона; *m* — опытный коэффициент, равный 0,026; *k* — опытный коэффициент, зависящий от вида бетона и равный 1,25—2; *t*, t_m — возраст материала в данный момент и при загружении в сутках

В табл. 31 приведены средние значения характеристики ползучести φ_t^c, меры ползучести C_t^c и влажностной усадки $\varepsilon_{ус}$, вычисленные на основании исследований.

Таблица 31

Показатели ползучести ячеистых бетонов

Ячеистый бетон	γ_c, кг/м³	R_c, кгс/см²	Характеристика ползучести φ_t^c	Мера ползучести $C_t^c \cdot 10^6$ в см²/кгс	Влажностная усадка $\varepsilon_{ус}^c$ в мм/м
На цементном, смешанном, шлаковом вяжущем и молотом кварцевом песке	700—900 1000—1200	50—75 100—200	[illegible] 1,4	70 30	0,6 0,5
На известковом вяжущем и молотом кварцевом песке	700—900 1000—1200	50—75 100—200	2 1,6	90 40	0,7 0,6

Примечания: 1. Средние значения φ_t^c, C_t^c и ε_y^c получены в результате [illegible] стонных призм в течение 2—6 лет.

2. Предельные значения $\varphi_{t\sim}^c$, $C_{t\sim}^c$ и $\varepsilon_{ус\sim}^c$ можно ориентировочно вычислить путем умножения показателей, приведенных в таблице, на коэффициент 1,2 для бетонов γ_c = [illegible] кг/м³ и на 1,1 для бетонов $\gamma_c = 1000-1200$ кг/м³.

Исследования ползучести автоклавных ячеистых бетонов, выполненные в последние годы в Донецком Промстройниипроекте под руководством С. В. Александровского [1] и в Киевском НИИСК под руководством В. И. Скатынского [73], показали, что для ячеистых бетонов удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными дает зависимость, предложенная С. В. Александровским для «старого» бетона [2]:

$$C(t-\tau) = A_3\left[1 - e^{-\gamma(t-\tau)}\right] + A_4\left[1 - e^{-\alpha(t-\tau)}\right], \quad (50)$$

где A_3 и A_4 — постоянные, определенные опытным путем. Численные значения коэффициентов, использованных в формуле (50), для некоторых видов ячеистых бетонов приведены в работах [1, 73].

Следует указать, что исследования по ползучести ячеистых бетонов выполнены еще в незначительном объеме. В последние годы этот пробел начал восполняться. Представляют интерес данные по ползучести, приведенные в работах Л. Раппамяги [65], Р. Селла [71], Л. Берега [80], Г. Бане [5], Ф. Крумля [87], Б. Данилова, Э. Багрия и В. Багрия [1], Ю. Крумелиса [73] и др.

Глава III

КОНСТРУКЦИИ ИЗ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ

1. КОНСТРУКЦИИ ИЗ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В СССР

В Советском Союзе ячеистые бетоны применяются в жилых, общественных, промышленных и сельскохозяйственных зданиях в виде несущих, самонесущих и ненесущих (навесных) элементов ограждающих конструкций.

В жилищном строительстве применяют следующие изделия и элементы конструкций из ячеистых бетонов

цельные или составные панели однорядной разрезки на одну комнату длиной до 360 *см* с одним оконным или дверным проемом или на две комнаты длиной до 600 *см* с двумя оконными или с одним оконным и одним дверным проемами. Оба вида панелей имеют высоту, равную высоте этажа (до 300 *см*), и толщину, определяемую теплотехническим расчетом (от 24 до 40 *см*).

стеновые полупанели полосовой двухблочной разрезки, состоящие из простеночных элементов длиной до 180 *см*, высотой до 150 *см* и поясных длиной до 640 *см*, высотой до 140 *см*. Толщина этих панелей также составляет от 24 до 40 *см*;

стеновые крупные простеночные блоки двухрядной разрезки шириной до 140 *см*, высотой до 270 *см* и толщиной от 24 до 40 *см*;

стеновые крупные блоки четырехрядной разрезки шириной до 140 *см*, высотой до 90 *см* и толщиной от 24 до 40 *см*;

стеновые мелкие блоки (камни) высотой до 30 *см*, длиной до 60 *см* и толщиной до 40 *см*;

однослойные плиты междуэтажных перекрытий длиной до 600 *см*, шириной до 150 *см* и толщиной 24 *см*;

однослойные плиты чердачных покрытий с обычной арматурой и двухслойные шириной от 80 до 200 *см*, длиной до 600 *см* и толщиной от 24 до 30 *см* с предварительно напряженной стержневой и проволочной арматурой; однослойные плиты покрытий совмещенных бесчердачных крыш шириной до 200 *см*, длиной до 670 *см* и толщиной от 30 до 38 *см* с вентилируемыми продухами.

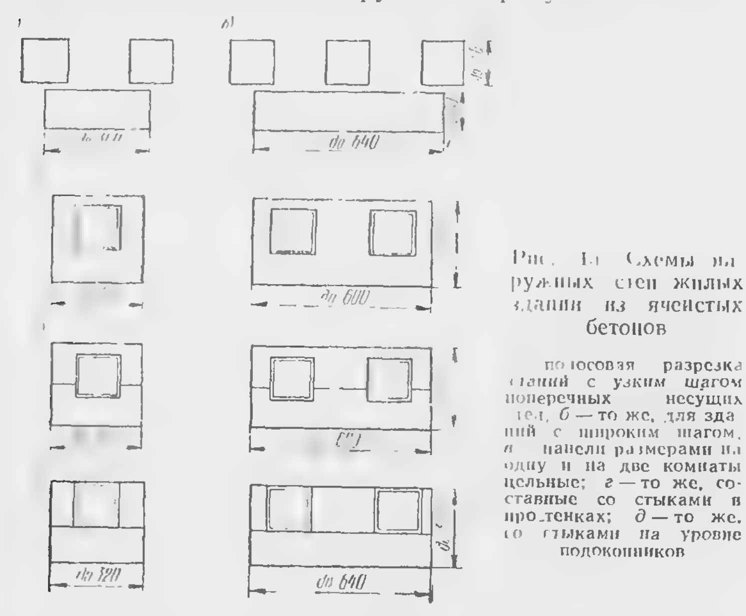


Рис. 43. Схемы наружных стен жилых зданий из ячеистых бетонов

а — полосовая разрезка зданий с узким шагом поперечных несущих стен, *б* — то же, для зданий с широким шагом, *в* — панели размерами на одну и на две комнаты цельные; *г* — то же, составные со стыками в простенках; *д* — то же, со стыками на уровне подоконников

В 1953 г. в Березниках был построен с использованием крупноразмерных ячеистобетонных элементов первый трехэтажный дом серии 439 с полосовой разрезкой наружных стен и шагом поперечных стен 3,6 *м* (рис. 43, *а*). Дома этой серии строились в г. Березники более 10 лет. В дальнейшем были разработаны и получили широкое распространение аналогичные дома (серии 467) с более длинными панелями — длиной до 6,4 *м* (рис. 44). Конструкция этих домов более индустриальна, чем предыдущих, так как имеет меньше монтажных элементов и швов. Однако в домах этих серий приходится окна и двери устанавливать, закреплять и отделывать на месте монтажа, что снижает индустриальность строительства. Особенно сложно выполнять эти работы в зимнее время.

Более прогрессивны однорядные ячеистобетонные стеновые панели высотой, равной высоте этажа, с полной заводской готовностью (см. рис. 43, *в, г, д*); во всех этих панелях окна и двери вставляют и панели окрашивают или офактуривают на заводе, а не при монтаже на месте строительства. Производство этих работ в заводских условиях вместо выполнения их на строительной площад-



Рис. 44. Стеновые панели полосовой разрезки (дома серии 467)

ке представляет большое преимущество однорядных панелей перед панелями полосовой разрезки. Однорядные панели делают цельными, составными со стыками в простенках и составными со стыками на уровне низа оконных проемов.

Цельные (несоставные) ячеистобетонные панели с одним или двумя оконными проемами применяют в основном в типовых домах серии 464 и 468. Таких крупных цельных панелей для стен жилых зданий не знает ни одна зарубежная страна. Для их производства в СССР созданы и применяются автоклавы диаметром 3,6 *м*, каких нет за рубежом. Однако потребность в таких автоклавах ограничивает возможность повсеместного изготовления панелей, так как многие заводы ячеистого бетона их не имеют. Кроме того, коэффициент использования объема автоклавов при изготовлении цельных панелей, имеющих оконные и дверные проемы уменьшается. В процессе из-

готовления в таких панелях часто появляются трещины. Технология их изготовления сложна. В цельных панелях приходится устанавливать повышенное количество арматурной стали. С их применением уменьшаются возможности разнообразия фасадов зданий. Все это является существенными недостатками цельных панелей.



Рис. 45. Ленинградский дом с панелями, имеющими стыки в простенках (в середине высоты этажа)



Рис. 46. Монтаж составных (укрупненных) ячеистобетонных панелей на строительстве экспериментального дома в Одессе (1964 г.)

Составные ячеистобетонные панели со стыками, расположенными в простенках, имеют почти те же недостатки, что и цельные панели. Кроме того, расположение горизонтальных швов в простенках и соединение полупанелей путем сварки закладных деталей нельзя считать удачным решением. Поэтому производство данных панелей на заводах в Ленинграде и Новосибирске прекращается (рис. 45).

Составные панели, изображенные на рис. 46, заводской стык в которых расположен на уровне низа оконных проемов, не имеют указанных недостатков. Отдельные элементы панелей соединяются между собой с помощью клея (полимерного или силикатного). Для изготовления элементов панелей не требуются автоклавы диаметром 3,6 *м*. Простеночные и поясные элементы можно изготовлять по резательной технологии или в кассетных формах и подвергать запариванию в автоклавах диаметром 2 *м*. При этом достигается более высокий коэффициент заполнения автоклавов. Вероятность появления технологических трещин снижается; сокращается расход стали на арматуру. Затраты труда на укрупнительную сборку (склеивание) панелей невелики и компенсируются указанными преимуществами.

Таким образом, более технологичными, трещиностойкими, дешевыми и удобными для решения архитектурных задач крупнопанельного домостроения являются составные панели (рис. 46). При их применении легче обеспечить разнообразие фасадов зданий, т. е. улучшить архитектуру крупнопанельного строительства без значительного увеличения парка форм. Поэтому новые типовые жилые дома проектируются в настоящее время с вариантами наружных стен из составных ячеистобетонных панелей, имеющих заводской стык на уровне низа окон.

Целесообразность перехода на составные панели подтверждает также зарубежный опыт. В ФРГ, Польше, Чехословакии и особенно широко в Швеции уже практически в течение нескольких лет применяются составные панели с размерами на одно и два окна.

Первые составные панели из ячеистого бетона в стенах жилых зданий были применены в СССР в 1964—1965 гг. на строительстве экспериментального дома в Одессе [75]. Поясные и простеночные элементы панелей изготовлялись в кассетных формах высотой 1,5 *м*, длиной 6 *м*. Элементы панелей соединялись на силикатном клее без тяжей. Для того чтобы клеевые швы не работали на растяжение, при подъеме панели и монтаже применена автоматическая прижимная траверса. За рубежом панели стягиваются вертикальными стальными тяжами, для пропуска которых в поясных и простеночных элементах просверливаются отверстия.

Внутренние несущие стены из ячеистобетонных элементов применяют у нас очень редко. Только в отдельных зданиях во внутренних стенах были использованы ячеистобетонные панели шириной около 150 *см*, высотой около 300 *см*, толщиной 16 или 24 *см* или мелкие ячеисто-

бетонные камни. Однако внутренние стены из силикатного кирпича оказываются дешевле стен из ячеистобетонных камней. Поэтому ячеистые бетоны вряд ли будут широко использоваться для изготовления элементов внутренних несущих стен. Возможно, что в дальнейшем их будут применять в виде внутриквартирных (ненесущих) перегородок, как это принято в зарубежных странах.

Междуэтажные перекрытия, как и внутренние стены, изготовляли у нас из ячеистых бетонов до сих пор также

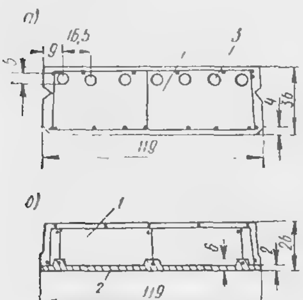


Рис. 47. Поперечные разрезы плит покрытий жилых зданий

а — бесчердачных, б — чердачных; 1 — ячеистый бетон; 2 — обычный тяжелый бетон; 3 — вентилируемые продухи

в незначительном количестве. Эффективность применения конструкций из ячеистых бетонов в перекрытиях гораздо меньше, чем в стенах. Поэтому ячеистобетонные перекрытия смогут найти широкое применение после полного удовлетворения строительства в стеновых материалах либо в отдельных специальных случаях.

Гораздо более целесообразно применять ячеистые бетоны в покрытиях жилых зданий.

В СССР разработаны конструкции ячеистобетонных панелей для бесчердачных и чердачных покрытий (рис. 47). В бесчердачных плитах рекомендуется устройство вентилирующих каналов диаметром около 5 *см*, через которые предусмотрено удаление паров и влаги, накапливающихся в верхней части плиты. Это улучшает теплоизоляционные свойства покрытий и повышает долговечность конструкций. В чердачных плитах осушающие каналы не требуются, так как влага удаляется через поверхность плит благодаря проветриванию чердачного пространства.

В чердачных плитах, изготовляемых на комбинате ЖБК № 2 в Москве, в нижней части укладывался слой обычного тяжелого бетона; расположенная в нем рабочая арматура — предварительно напряженная. Этот слой выполняет функцию пароизоляции и улучшает условия работы арматуры. Предварительное напряжение увеличивает жесткость плит, что позволяет сократить расход стали. Эта в целом рациональная конструкция имеет тот недостаток, что устройство плотного бетона усложняет процесс производства. Кроме того, плиты невозможно изготовлять с помощью резательных машин, как это делается почти на всех заводах в других странах. Более удобно осуществлять предварительное натяжение арматуры без устройства нижнего плотного бетонного слоя. Такие однородные преднапряженные плиты находятся в стадии разработки.

Ячеистобетонные крыши жилых зданий дешевле железобетонных, имеющих тот или иной утеплитель, и индустриальнее (требуется гораздо меньше ручного труда на месте строительства). Поэтому они должны найти в дальнейшем широкое применение.

Производство и применение стеновых панелей из ячеистых бетонов для жилищного строительства регламентируется ГОСТ 11118—65 [26]. Согласно этому стандарту стеновые панели из ячеистого бетона можно применять также и в зданиях общественного назначения: в школах, больницах, детских садах, яслях и т. п. Применение ячеистобетонных панелей в этих зданиях так же эффективно, как и в жилых.

Крупные стеновые блоки двухрядной и четырехрядной разрезки применялись в домах с продольными несущими стенами. В последнее время дома этой системы строятся реже, поэтому производство крупных блоков сокращается. Намечается рост производства мелких стеновых блоков (камней), стены из которых на 20—40% дешевле кирпичных и в 3—4 раза легче их [50]. Для расширения применения ячеистобетонных стеновых камней в 1969 г. выпущены Межреспубликанские технические условия на эти камни [55] и разрабатываются проекты малоэтажных зданий со стенами из них.

Для промышленных зданий в разное время были разработаны следующие конструкции из ячеистых бетонов:

однослойные и двухслойные стеновые панели длиной, как правило, 600 *см*, а в отдельных случаях 900 и 1200 *см*; высота панелей 120 и 180 *см*, толщина от 20 до 30 *см*;

ребристые плиты покрытий с продольными ребрами

из тяжелого бетона высотой 20 *см* с обычным армированием (КАП), с предварительно напряженной арматурой (КАПН), с продольными и поперечными ребрами из ячеистого бетона (ОКАП); размер плит в плане 150×600 *см*, толщина надреберной плоской ячеистобетонной плиты от 10 до 16 *см* (рис. 48, *а*);

плоские плиты покрытия размером в плане 150×600 *см*, толщиной от 20 до 24 *см* следующих типов: ГКП — плоские однослойные крупноразмерные плиты с обычным армированием и ПНП — предварительно напряженные двухслойные плоские плиты с проволочной арматурой (рис. 48, *б*);

плоские однослойные мелкие плиты шириной 50 *см*, длиной 300 *см* и толщиной от 10 до 16 *см* (рис. 48, *в*).

В промышленных зданиях наиболее эффективно применение ячеистых бетонов в наружных стенах. Ячеистобетонные стены промышленных зданий на 20—40 % дешевле и легче стен из других крупных панелей (например, из керамзитобетона) [52].

Наиболее распространенным массовым типовым изделием для стен промышленных зданий является ячеистобетонная панель длиной 600 *см*, высотой 120 или 180 *см*, толщиной 20, 24 и 30 *см*. Ячеистый бетон панелей имеет объемный вес 700 *кг/м*³; в перспективе переход на объемный вес 600 и 550 *кг/м*³. Такие панели (рис. 48, *г*) изготовляют на многих заводах довольно в большом количестве — более 2 млн. *м*² в год. Их применение дает большой экономический эффект.

Эти панели более индустриальны, чем стеновые панели шириной 60 *см*, выпускаемые на многих зарубежных заводах фирм «Сипорекс», «Итонг», «Дюрокс» и др. Стены из панелей шириной 120 *см* собирают быстрее, они имеют в два раза меньше швов и дешевле стоят. Поэтому стеновые панели шириной 120 *см* найдут в будущем широкое применение

Еще более индустриальны 12-метровые ячеистобетонные стеновые панели (рис. 48, *д*). Они особенно нужны для строительства зданий, в которых колонны в продольных стенах располагаются с шагом 12 *м* (например, стены машинных залов и котельных электростанций).

Стеновые панели промышленных зданий ранее изготовляли с наружным слоем толщиной 2,5—4 *см* из плотного бетона, иногда из поризованного (аэрированного) бетона объемного веса около 1200 *кг/м*³, чаще всего их

делают однослойными. В последнем случае отделку производят после автоклавной обработки на заводе или на месте строительства после монтажа.

В зданиях с влажным режимом помещений слой плотного бетона толщиной 2,5—7 *см* устраивают с внутренней стороны стен.

Панели прикрепляют к колоннам с помощью гибких связей (болтов) или путем приварки закладных деталей,

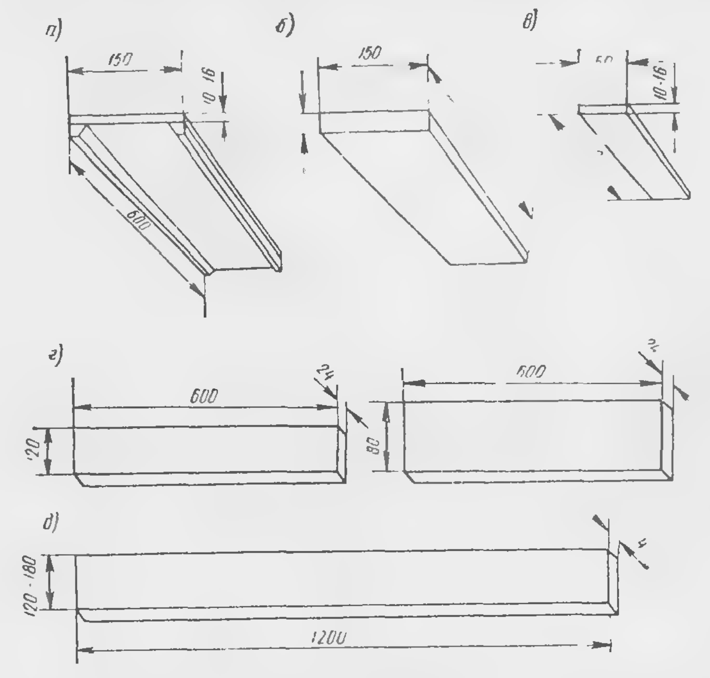


Рис. 48. Ячеистобетонные конструкции покрытий и стен промышленных зданий

а — ребристая плита покрытия; *б* — плоская плита покрытия длиной 600 *см*; *в* — плоская плита покрытия длиной 300 *см*; *г* — стеновая панель длиной 600 *см*; *д* — стеновая панель длиной 1200 *см*

предусматриваемых в панелях и в колоннах. В первом случае стеновые панели имеют некоторую возможность свободно перемещаться в вертикальном направлении относительно колонн; внизу они опираются на рандбалки. Такие стены называют самонесущими. Они воспринимают нагрузку от собственного веса стен и ветра. Во вто-

ром случае панели называют навесными (ненесущими), так как каждую панель прикрепляют на колоннах независимо от других. Такая панель воспринимает нагрузку только от собственного веса и от ветра.

Производство и применение стеновых панелей промышленных зданий регламентируется ГОСТ 11690—66 [27].

В покрытиях промышленных зданий, начиная с 1953 г. стали применяться ребристые ячеистобетонные крупноразмерные плиты (см. рис. 48, *а*) вместо мелких (рис. 48, *в*). Крупноразмерные плиты имеют размеры в плане 160×600 *см*. Ребра плит делают из обычного тяжелого бетона. Верхняя часть этих плит (полка) имеет толщину 10—16 *см*. Плиты другого типа плоские, однородные, выполняются целиком из ячеистого бетона. Толщина их 24—30 *см*.

В последнее время в ребристых плитах применяется предварительное натяжение основной рабочей арматуры, расположенной в продольных ребрах. Это позволяет увеличить жесткость плит и снизить расход стали. Производство и применение ребристых ячеистобетонных плит регламентируется ГОСТ 7741—66 [28].

На ребристые плиты расходуется меньше бетона и стали, чем на плоские. Однако стоимость плоских плит меньше, так как они лучше заполняют автоклавы, чем ребристые. Кроме того, необходимо учитывать, что ребристые плиты невозможно изготовлять с помощью резательных машин. Таким образом плоские ячеистобетонные плиты покрытий производственных зданий являются более перспективными, чем ребристые.

В общественных зданиях изделия из ячеистых бетонов применяются сравнительно недавно. Для строительства школ, больниц, детских садов, клубов, магазинов и т. д. используют стеновые блоки, блоки-полупанели и плиты покрытий, аналогичные применяемым в жилищном и промышленном строительстве. Строительство общественных зданий ведут в соответствии с комплексными типовыми сериями I-467, I-468, I-335 и др.

Изделия из различных видов ячеистого бетона в последние годы начали применять и в сельскохозяйственном строительстве для стен и покрытий жилых, а также производственных зданий.

В сельском строительстве, так же как и в городском, могут применяться крупные панели с размерами на одно

или два окна, полупанели полосовой разрезки, крупные и мелкие блоки (камни). Однако крупные панели применяются реже, так как для их перевозки нужны специальные панелевозы, а для монтажа — мощные краны.



Рис. 49. Сблокированные дома со стенами полосовой разрезки в поселке Эммаус (Калининская обл.)

Из-за дальности перевозки и строительства на селе преимущественно малоэтажных зданий более удобно применять стены полосовой резрезки (рис. 49), а для индивидуального строительства - мелкие стеновые блоки (камни).

В производственных сельскохозяйственных зданиях (главным образом животноводческих), имеющих большую влажность и содержащих некоторые химически агрессивные газы, стены и покрытия из ячеистых бетонов (так же, как и из легких бетонов) должны иметь на внутренних поверхностях специальную пароизоляцию (слой тяжелого бетона, масляная, эмалевая или лаковая окраска). В отдельных случаях имеются примеры нормальной эксплуатации стен из ячеистого бетона и без нанесения пароизоляции. Так, вполне успешно применяются однослойные панели из сланцезольного газобетона (газокукермита) в Эстонии. В перспективе возможно применение в животноводческих зданиях однослойных

конструкций из гидрофобизированного ячеистого бетона, который благодаря вводимым добавкам приобретает водоотталкивающие свойства.

2. КОНСТРУКЦИИ ИЗ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ЗА РУБЕЖОМ

Ячеистые бетоны — газобетон, газосиликат, газозолосиликат, газошлакобетон и др. - применяют в ряде стран Европы, Азии, Америки и Африки. Однако в основном заводы ячеистого бетона расположены в Европе: в Швеции, Норвегии, Финляндии, Дании, Англии, Голландии, ФРГ, ГДР, Польше, Чехословакии, Румынии, Болгарии, Югославии, где этот вид бетона применяют очень широко. В зарубежной практике тот или иной вид бетона называют по наименованию фирмы, его выпускающей: сипорекс, итонг, дюрокс, селкон, термолайт.

Наибольшее распространение ячеистый бетон получил в Швеции, где его производят около 1,5 млн. $м^3$ в год, что составляет примерно 200 $м^3$ на 1000 человек. Ячеистый бетон в Швеции является основным стеновым материалом; он практически вытеснил кирпич и бетоны на легких пористых заполнителях. Выпускают ячеистый бетон в основном две фирмы: «Итонг» и «Сипорекс». Первая производит газозолосиликат, а вторая — газобетон. Однако при строительстве заводов за рубежом обе фирмы применяют в зависимости от местных условий цемент и известь, песок, золу и шлаки. В последнее время и в Швеции фирма «Итонг» использует не только известь, но и цемент, а также песок наряду с золой.

Изготовляемые в Швеции ячеистые бетоны имеют высокие показатели. Прочность в кубах размером 15×15×15 *см* и влажностью 8% составляет

при объемном весе 500 *кг/м³*		3[illegible] *кгс/см²*
600 »		40—50 »
700 »		50—60 »

В последнее время фирма «Итонг» сообщает, что при объемном весе ячеистого бетона 650 *кг/м³* гарантируется прочность его не менее 65 *кгс/см²*.

В других странах, где опыт применения ячеистых бетонов не очень большой, прочность их (при указанных

объемных весах) несколько ниже. Даже построенные по лицензиям фирм «Итонг» и «Сипорекс» заводы в других странах (например, в Англии) выпускают ячеистые бетоны с гораздо меньшей прочностью.

В Швеции и в других странах наиболее распространенными изделиями из ячеистых бетонов являются мелкие штучные блоки (камни), имеющие длину 50—75 *см*,



Рис. 50. Фрезеровальный станок для обработки стеновых ячеистобетонных камней



Рис. 51. Кладка ячеистобетонных камней «насухо»

высоту 25 *см* и толщину от 15 до 30 *см* с интервалом в 2,5 *см*. Блоки (камни) изготовляют из ячеистых бетонов объемного веса от 400 до 700 *кг/м³*. Их применяют в несущих стенах жилых зданий высотой до четырех этажей, а также иногда и в ненесущих наружных и внутренних стенах.

Объем производства этих камней в некоторых странах составляет 70—80% общего объема производства ячеистого бетона.

Как правило, стены из мелких блоков штукатурят. Для лучшего сцепления штукатурки с камнями на них наносят при изготовлении неглубокие борозды (насечку), однако в ряде случаев стены из блоков оставляют без наружной отделки и, несмотря на это, они удовлетворительно эксплуатируются в течение многих лет.

В последние годы стеновые камни стали подвергать обработке на фрезеровальных станках (рис. 50), после чего они имеют точные геометрические размеры с допусками ±0,5 *мм*. Это позволяет вести монтаж таких камней на клею или насухо на шпонках (рис. 51).

В наружных стенах жилых зданий за рубежом ши-



Рис. 52. Монтаж одноэтажного дома со стенами и покрытием из ячеистобетонных плит

роко используют вертикальные крупные блоки шириной 50—60 *см*, высотой, равной высоте этажа, 280—300 *см*. Крупные блоки изготовляют из ячеистого бетона объемного веса 500—700 *кг/м*³. Толщина их равна 25 *см* и менее с градацией через 2,5 *см*. Из вертикальных стеновых крупных блоков строят малоэтажные (рис. 52) и многоэтажные жилые дома (рис. 53). В малоэтажных домах стены из вертикальных блоков — несущие, а в многоэтажных — ненесущие. Наружные поверхности стен из вертикальных блоков обычно не штукатурятся, их обрабатывают краской или набрызгом либо оставляют без всякой обработки.

Над дверными и оконными проемами укладывают перемычки из ячеистого бетона объемного веса 600—700 *кг/м*³. Перемычки армируют в зависимости от пролета и нагрузки. При длине до 200 *см* перемычки укладывают вручную двое рабочих.

В целях создания конструкций, не требующих при монтаже не только кранов, но и других каких-либо приспособлений фирмой «Итонг» были разработаны так называемые брусковые дома. Стены этих домов высотой 280—300 *см* собирали вручную из вертикальных брусков, имеющих по фасаду размер, равный 10 *см*. Ширина брусков, равная 20, 25 и 30 *см*, соответствует толщине стены. Бруски армированы двумя стержнями диаметром 4—5 *мм*. При монтаже соприкасающиеся поверхности брусков смазывали клеем, кроме того, бруски соединяли гвоздями. В последние годы такие конструкции не применяются.



Рис 53. Монтаж многоэтажного жилого дома со стенами из вертикальных блоков

Другим изделием при монтаже вручную, довольно широко применяемым за рубежом, являются перегородочные плиты шириной 50—60 *см*, длиной 280—300 *см*, толщиной 7—10 *см*. Из этих плит делают внутриквартирные перегородки. Плиты ставятся вертикально. Их подклинивают и подливают раствором снизу. Вертикальные швы (стыки) между плитами иногда выполняются с применением клеевидного раствора, а чаще всего насухо впритык или в виде шпунтового соединения. Лицевые поверхности плит, так же как и вертикальные швы, ничем не затираются. Они готовы для покраски (побелки) или наклеивания обоев. Высокая точность размеров, прямолинейность кромок и чистота поверхностей данных перегородочных плит (так же, как и других изделий из ячеистых бетонов в зарубежной практике) достигается в результате применения резательных и калибровочных машин.

Для повышения теплоизоляционных характеристик и дополнительного снижения веса элементов наружных стен фирма «Сипорекс» начала несколько лет назад выпускать трехслойные крупные блоки типа «сэндвич».

Наружные слои в этих блоках выполнены из газобетона толщиной 7 *см*, внутренний — из вспененного пластика — стиропора толщиной 6 *см*. Такие стены имеют повышенное термическое сопротивление и очень небольшой вес, порядка 100—120 *кг/м*².

На рис. 54 показана калибровка трехслойных блоков. Соединение слоев блоков между собой осуществляется с помощью клея. В качестве наружных газобетонных слоев блоков типа «сэндвич» используются перегородочные плиты толщиной 7 *см*.



Рис. 54. Калибровка стенового трехслойного блока типа «сэндвич»

Перегородочные плиты, описанные выше, применяются иногда (например, в Дании) для наружных стен другой трехслойной конструкции (рис. 55): слой, обращенный в помещение, делается из газобетонных плит толщиной около 10 *см*, высотой на этаж (2,8—3 *м*) или из мелких плиток той же толщины. Следующий (средний) слой стенки выполняют из минераловатных плит толщиной 5—6 *см*. Наружный слой стены выполняется из кирпичной кладки толщиной в полкирпича. Применение наружной кирпичной облицовки объясняется желанием отдельных заказчиков иметь фасады, похожие на традиционные старинные кирпичные здания. Этот вид трехслойных стен применяется только в малоэтажном строительстве.

Трехслойные конструкции с наружными слоями из ячеистого бетона применяются также за рубежом во внутренних междуквартирных стенах для обеспечения повышенной звукоизоляции. При этом если данные внутренние стены являются несущими, наружные слои стен изготовляют из газобетонных плит толщиной 15 *см*

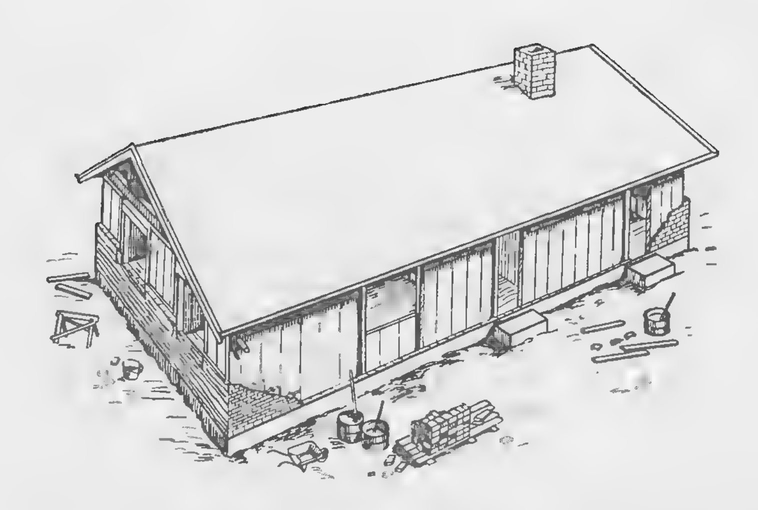


Рис. 55. Строительство дома с наружными трехслойными стенами, состоящими из газобетонных плит, среднего минераловатного слоя и наружной облицовки в полкирпича



Рис. 56. Трехслойные внутренние несущие стены в двухэтажных домах (Стокгольм)

(рис. 56). Средний слой состоит из минераловатных плит, прикрепляемых к газобетонным плитам гвоздями.

В целом же в зарубежной практике строительства с применением конструкций из ячеистых бетонов вслед



Рис. 57. Дома с двухблочной разрезкой наружных стен (березниковского типа), строящиеся фирмой «Сипорекс»

за нашим отечественным опытом отмечается стремление к разработке и использованию укрупненных, т. е. наиболее индустриальных конструкций.

В небольшом количестве за рубежом применяют крупные стеновые панели размером 1,5×6 *м*. Из этих панелей возводятся стены различных общественных зданий полосовой (поясной) разрезки. Были попытки применить подобную полосовую разрезку и в стенах жилых зданий. Так, фирма «Сипорекс» в 1957 г. построила несколько жилых зданий с полосовой разрезкой наружных стен, которые были несущими [49]. Отказавшись затем от такой конструкции, фирма в дальнейшем строила трехэтажные дома с наружными ненесущими стенами (с несущими поперечными стенами), которые в точности повторяют так называемые дома березниковского типа, строившиеся у нас в 1953 г. (рис. 57). Эти дома применяют за рубежом в небольшом объеме.

Наиболее крупные и индустриальные конструкции стен жилых зданий — крупные панели с размерами на одно или два окна (на один или два планировочных модуля, т. е. на одну или две комнаты) — производят: фирма «Хэбель» (ФРГ), несколько заводов в ЧССР и особенно много — фирма «Итонг» в Швеции (рис. 58).

Общим для зарубежных крупных составных стеновых панелей жилых зданий является то, что они собираются из сравнительно мелких исходных элементов, из-

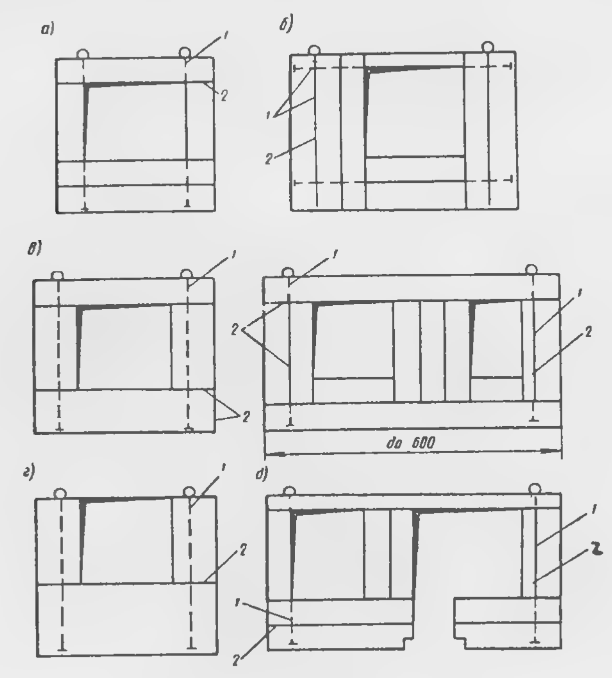


Рис. 58. Схемы составных стеновых панелей, применяемых за рубежом

а — фирмой «Сипорекс»; *б* — фирмой «Хэбель»; *в* — фирмой «Итонг»; *г* — в Чехословакии; *д* — в Польше; *1* — стальные тяжи; *2* — швы между ячеистобетонными элементами

готовляемых по резательной технологии. При этом способе изготовления в массовом порядке выпускаются изделия шириной 60 *см* и длиной до 6 *м*.

Основным соединительным элементом составных панелей за рубежом являются стальные тяжи, которые стягивают склеенные между собой ячеистобетонные элементы и придают им жесткость и прочность, необходимые при складировании, транспортировании и монтаже.

В большинстве зарубежных панелей тяжи располагаются вертикально (Швеция, Польша, ЧССР). Они используются и для крепления подъемных петель. Фирма «Хэбель» (ФРГ) применяет горизонтальные тяжи (рис. 59). На предприятиях фирмы «Итонг» при сборке панелей тяжи натягивают с помощью тарированных гайковертов на заданное усилие, и таким образом осуществляется предварительное натяжение арматуры с упором на бетон (т. е. последующее натяжение).



Рис. 59. Составная панель фирмы «Хэбель»

Для сборки составных панелей на заводах за рубежом применяются стенды (ЧССР) или конвейеры (ПНР и Швеция). Наиболее интересной является конвейерная линия укрупнительной сборки, осуществленная шведской фирмой «Итонг» в районе расположения своих основных заводов — в районе Хеллаброттет. В специальном цехе размером примерно 30×150 *м* вдоль него размещен рольганг шириной около 3 *м* (что соответствует высоте панелей). Панели собираются и перемещаются по рольгангу в горизонтальном положении. В начале конвейера в закрытой камере размером 4×15 *м* газобетонные элементы подвергаются перед сборкой окончательной обработке: в некоторых из них просверливаются отверстия, в других с помощью дисковых пил выбираются четверти (например, в перемычечных элементах для ввода в них междуэтажных перекрытий). Следующий, основной, пост конвейера — сборочный. С помощью легких тельферов на рольганге раскладываются перемычечные, поясные и простеночные элементы. На соприкасающиеся плоскости этих элементов набрызгивается клей. В просверленные отверстия вставляются тяжи, которые натягиваются тарированными гайковертами. После этого панель перемещается по рольгангу на первый, а затем и на последующие посты отделки. Сначала панель калибруется сверху «волчком» диаметром 70 *см*.

Затем на панель наносится клеевой состав, приготовленный на базе акриловой смолы. На следующем посту на клеевой состав насыпается цветной песок, и в конце конвейера лицевая поверхность снова покрывается клеевым составом. Этот способ отделки фирма «Итонг» называет «серпокрыл».

По выходе с конвейера панели перекантовываются



Рис. 60. Составные стеновые панели с размерами на одно и два окна фирмы «Итонг»

в вертикальное положение и в них вставляются оконные или дверные блоки.

Изготовленные таким способом составные панели фирма «Итонг» перевозит на расстояние до 200 *км*. На рис. 60 показан дом со стенами из этих панелей, построенный в Стокгольме.

В несколько меньшем масштабе составные стеновые панели производятся и применяются в Чехословакии, где уже три завода выпускают такие панели. Они имеют полосовую разрезку, такую же, как осуществлена у нас на строительстве дома в Одессе, и стальные тяжи, применяемые в Швеции, ФРГ и ПНР.

Все изложенное свидетельствует о том, что за рубежом составные стеновые панели жилых зданий имеют довольно широкое применение.

Также широко применяются конструкции из ячеистых бетонов за рубежом и в междуэтажных перекрыти-

ях жилых зданий (рис. 61). Наиболее распространенной конструкцией перекрытий являются плиты шириной 60 *см*, длиной до 6 *м*, толщиной от 16 до 25 *см* (в за-

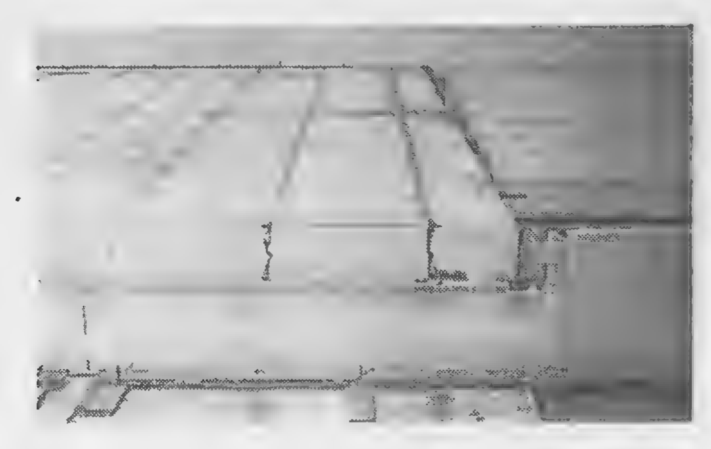


Рис. 61. Междуэтажное перекрытие с плитами из ячеистого бетона



Рис. 62. Производственное здание со стеновыми панелями из ячеистого бетона (Швеция)

висимости от пролета и нагрузки). Плиты изготовляются из газобетона объемного веса 500 *кг/м*^{3}. По боковым граням плит чаще всего устраиваются шип (с одной

стороны) и паз (с другой) для обеспечения совместной работы плит между собой при неравномерном нагружении. Эти же плиты применяются за рубежом также в перекрытиях над подвалами и в чердачных перекрытиях.

Аналогичные плиты шириной 60 *см* и длиной до 600 *см* из газобетона объемного веса 500 *кг/м*^{3} широко используются за рубежом в стенах (рис. 62) и покрытиях промышленных зданий. Толщина плит назначается от 15 до 25 *см* в зависимости от пролета (до 6 *м*), от ветровой или снеговой нагрузок, а также от необходимого термического сопротивления.



Рис. 63. Монтаж стеновых плит производственного здания

Плиты стен промышленных зданий располагаются обычно горизонтально и устанавливаются на место с помощью клещевых захватов (рис. 63). Плиты крепятся к колоннам чаще всего нащельниками из нержавеющей или оцинкованной стали. Это обеспечивает возможность некоторой раздвижки стеновых плит вследствие температурных деформаций. Швы между стеновыми плитами раньше выполнялись с помощью цементного раствора, а в последние годы в швах используются ленточные пенопластовые прокладки нужной ширины, прикрепляемые гвоздями к панелям во время их монтажа.

Плиты покрытий промышленных зданий соединяют между собой чаще всего при помощи шипа и паза. Кроме того, на верхних продольных ребрах плит устраиваются фаски, заливаемые раствором. С нижней стороны плит также делаются фаски, которые обычно не затираются. Тем не менее нижняя поверхность покрытий имеет хороший вид. Плиты покрытий укладывают на место с помощью башенных или автомобильных кранов, легких кранов-укосин или тележек, перемещаемых по покрытию, а иногда даже и вручную (при длине плит до 3 *м*).

Следует отметить довольно смелое применение за рубежом ячеистых бетонов в строительстве зданий, расположенных в сейсмических районах. В этих районах строятся описанные выше малоэтажные здания со стенами из вертикальных блоков или камней (мелких блоков) с укладкой арматуры в швах между плитами междуэтажных и чердачных перекрытий, а также по периметру перекрытий. В последнем случае для укладки арматуры в плитах вынимаются пазы или четверти, заливаемые затем раствором или бетоном (на мелком щебне). Легкое и простое устройство пазов и четвертей обусловливается удобообрабатываемостью ячеистых бетонов, которые допускают распиловку и строжку наподобие древесины. Таким образом в зданиях из ячеистого бетона получаются, по существу, как бы облегченные железобетонные антисейсмические пояса небольшого сечения. Такие же железобетонные пояса могут устраиваться и с натяжением арматуры на ячеистый бетон во время монтажа зданий. Вертикальной арматурой, создающей обжатие стен, могут служить тяжи описанных выше составных панелей.

Имеются также примеры применения ячеистых бетонов в сейсмических районах и в многоэтажных зданиях. На рис. 64 показано 43-этажное здание, построенное в Мексике, с наружными стенами, перегородками и перекрытиями из ячеистого бетона. Стены и перегородки в этом здании ненесущие. Здание имеет мощный стальной каркас. От применения ячеистого бетона в данном случае достигнут существенный эффект: пропорционально снижению веса здания (по сравнению с обычными традиционными материалами в несколько раз) снизилась сейсмическая нагрузка, и в результате были облегчены и удешевлены каркас и фундамент.

3. ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ

С 1953 г. впервые в мировой практике в нашей стране началось применение крупноразмерных плит размером в плане 150×600 *см* для покрытий промышленных зданий. Сначала были разработаны ребристые плиты



Рис. 64. 43-этажное здание в Мексике с наружными стенами, перекрытиями и перегородками из ячеистого бетона

КАП, а затем плоские плиты ГКП. В настоящее время производство и применение ребристых плит КАП почти прекратилось из-за некоторых технологических затруднений, вызываемых наличием ребер из плотного бетона и сложности изготовления арматурных каркасов. Полностью прекращено производство мелких плит.

Объем производства различных конструкций из ячеистых бетонов в СССР в 1970 г. приведен в табл. 32.

Таблица 32

Производство ячеистых бетонов[1]

Виды изделий	Объем в тыс. $м^3$ в год
Ребристые плиты КАП для покрытий промышленных зданий	40
Плоские плиты ГКП для покрытий промышленных зданий	130
Панели стен промышленных зданий	650
Панели стен жилых зданий	320
Несущие и теплоизоляционные армированные плиты покрытий жилых зданий	130
Неармированные стеновые камни и блоки	480
Теплоизоляционные неармированные плиты	2250
Итого	3980

[1] По неполным данным за 1970 г

Более широко, чем плиты КАП, употребляются в покрытиях промышленных зданий плоские 6-метровые плиты покрытий ГКП, изготовляемые по типовым чертежам серии ПК-01-92. По суммарной трудоемкости монтажа и изготовления плиты ГКП являются одной из наиболее индустриальных конструкций покрытий промышленных зданий. Покрытия с плитами ГКП по стоимости примерно равноценны покрытиям с другими железобетонными плитами. К недостатку плит ГКП относится большой расход арматурной стали (около 10 $кг/м^2$).

Преимуществом плоских плит ГКП является также то, что их можно формовать по резательной технологии. Это еще более существенно снизит трудоемкость, а также стоимость изготовления данных плит

Вместо плит длиной 3 *м*, толщиной 14—16 *см* должны найти применение такие же тонкие плоские плиты с рабочим пролетом 3 *м*, но с большей шириной и длиной, а именно, 1,5 и 6 *м*, которые будут работать как двухпролетные. Расход арматуры в них будет меньше, чем у плит ГКП. Изготовление этих плит будет производиться по резательной технологии. При этом должно быть налажено также и производство прогонов длиной 12 и 18 *м* (железобетонных или стальных).

Более широко применяются ячеистые бетоны в промышленном строительстве в виде стеновых панелей. Объем выпуска таких панелей в 1970 г. обеспечил возведение около 2,5 млн. $м^2$ стен. По сравнению с другими крупнопанельные стены из ячеистобетонных панелей на 20—40% (на 2—5 $руб/м^2$) дешевле и на 15—45% легче. Наибольшее распространение имеют панели размером 1,2×6 *м*, реже применяются панели размером 1,8×6 *м* и еще реже — панели длиной 12 *м* (шириной 1,2 или 1,8 *м*).

Более эффективными являются панели стен промышленных зданий, которые будут изготовляться по новым чертежам серии 432 (выпуск 6), разработанным взамен чертежей серии СТ-02-31 институтами ЦНИИПромзданий, Уралпромстройниипроект и НИИЖБ. В этих панелях предусматривается использование ячеистого бетона объемного веса 600 $кг/м^3$ (при контрольной прочности около 40 $кгс/см^2$). Таким образом стены из этих панелей будут еще легче (на 15%) и дешевле (на 5—10%) при той же толщине. Если же при этом уменьшить толщину панелей (например, с 24 до 22—20 *см*), то эффект от применения облегченных панелей из ячеистого бетона будет еще выше. Панели стен промышленных зданий можно изготовлять по резательной технологии, что даст также дополнительный эффект снижения трудоемкости монтажа и изготовления панелей.

Следует отметить, что отечественные конструкции стен и покрытий промышленных зданий из ячеистых бетонов, имеющие ширину 1,2; 1,5; 1,8 *м* и длину 6 и 12 *м*, являются более индустриальными, чем зарубежные, имеющие ширину 0,6 и длину только до 6 *м*.

Еще более эффективны предварительно напряженные плиты стен и покрытий из ячеистого бетона, разрабатываемые совместно НИИЖБ, ЦНИИСК и Уралпромстройниипроектом. Применение предварительного

натяжения арматуры в этих конструкциях повышает трещиностойкость, увеличивает жесткость и в ряде случаев позволяет сократить расход стали.

Стеновые панели жилых зданий из ячеистобетонных панелей по весу, стоимости и капиталовложениям эффективнее трехслойных, керамзитобетонных, аглопоритобетонных, шлакопемзобетонных (табл. 33). Поэтому планируется значительное расширение производства ячеистобетонных панелей. При этом в типовых домах новых серий (заменяющих серии 464, 467 и 468) предусматриваются наружные стеновые панели с полной заводской готовностью, изготовляемые путем укрупнительной сборки из ячеистобетонных элементов объемного веса 600 *кг/м*³. Следовательно, новые ячеистобетонные стеновые панели будут иметь лучшие показатели, чем указанные в табл. 33. В перспективе на основе опыта передовых отечественных заводов, а также зарубежной практики будет осуществлен переход на применение ячеистых бетонов объемного веса 500 *кг/м*³.

Таблица 33

Технико-экономические показатели стеновых конструкций жилых зданий*

Конструкции	Толщина в *см*	Вес в *кг/м*²	Себестоимость в *руб/м*²	Капиталовложения в *руб/м*²
Ячеистобетонные объемного веса 700 *кг/м*³ на основе цемента	25	200**	8	9,6
То же, на основе извести	25	200**	7,5	8,8
Две железобетонные скорлупы с минераловатными плитами	25	235	11,4	12,2
Керамзитобетонные объемного веса 900 *кг/м*³	26	234	8,9	11,6
То же, 1200 *кг/м*³	32	384	10,1	13,3
Аглопоритобетонные объемного веса 1400 *кг/м*³	40	560	11,9	13,5
Шлакопемзобетонные объемного веса 1400 *кг/м*³	35	490	9,1	11,3
Перлитобетонные объемного веса 800 *кг/м*³	25	240	8,6	12,1
Из глиняного кирпича	66	1185	14,2	13,9
» силикатного »	66	1250	10,6	10,4

* [illegible] СССР, опубликованным в докладе [illegible] конференции по бетону и железобе[illegible]

** [illegible]

Другими весьма эффективными изделиями из ячеистых бетонов для жилищного строительства являются плиты для чердачных и особенно бесчердачных покрытий. Подсчеты показывают, что стоимость 1 *м*² покрытия жилого дома в виде бесчердачных ячеистобетонных совмещенных плит составляет 14,7 руб. и трудоемкость монтажа 0,16 *чел.-час/м*², тогда как стоимость и трудоемкость монтажа типового покрытия дома серии 464 из железобетонного многопустотного настила, утепленного ячеистобетонной теплоизоляцией с цементной стяжкой, составляют 22,5 руб. и 0,57 *чел.-час/м*². Таким образом, покрытия из бесчердачных ячеистобетонных плит, совмещающих в себе функции несущих и теплоизоляционных элементов, на 7,8 *руб/м*² (на 35%) дешевле и монтаж их в 3,5 раза менее трудоемок, чем указанного многослойного покрытия. Поэтому производство и применение ячеистобетонных совмещенных несущих плит (особенно для бесчердачных покрытий жилых зданий) должно значительно расширяться. Эти плиты могут применяться с таким же эффектом не только в покрытиях крупнопанельных домов, но и в покрытиях обычных кирпичных или блочных домов.

Некоторое распространение в нашей практике имеют наряду с несущими совмещенными плитами покрытий жилых зданий так называемые армированные теплоизоляционные плиты — крупноразмерные изделия из теплоизоляционного ячеистого бетона (объемного веса 350—450 *кг/м*³), которые укладываются на несущие железобетонные чердачные плиты (сплошные или многопустотные). Ячеистобетонные теплоизоляционные плиты имеют легкую арматуру, рассчитанную на усилия от собственного веса плит, возникающие при распалубке, транспортировании и монтаже. Данная конструкция покрытия не является перспективной, ибо при соответствующем армировании плиты из ячеистого бетона могут сами (т. е. без железобетонных плит) выполнять функции несущих конструкций.

В междуэтажных перекрытиях и внутренних стенах жилых зданий ячеистые бетоны применяются до сего времени крайне незначительно. С этими конструкциями было построено по существу только несколько домов в Березниках (серия 439), по одному дому в Пензе и Павлодаре (по проектам ЛенЗНИИЭП) и ряд домов в Ленинграде (с внутренними несущими стенами). Объ

ясняется это тем, что эффективность применения ячеистых бетонов в данных конструкциях меньше, чем в стенах, а также тем, что промышленность сборного железобетона поставляет строительству в большом количестве железобетонные междуэтажные перекрытия (сплошные и многопустотные, с обычной и предварительно напряженной арматурой), а также внутренние несущие железобетонные стены, изготовляемые в кассетных установках. Кроме того, следует считать, что конструктивно-теплоизоляционный ячеистый бетон целесообразнее применять в наружных ограждающих конструкциях, так как в настоящее время еще ощущается дефицит в стеновых материалах.

В строительстве общественных и сельских жилых зданий также должно расширяться применение ячеистых бетонов в наружных стенах (в виде составных крупных панелей) и в чердачных и бесчердачных покрытиях (с вентилирующими продухами или без них). В отдельных случаях для сельских жилых и общественных зданий целесообразно применение панелей полосовой разрезки березниковского типа.

Как указывалось выше, применение крупных неармированных ячеистобетонных блоков двухрядной и четырехрядной разрезки почти прекратилось. Расширяется производство и применение мелких стеновых блоков (камней). Объясняется это тем, что стены из ячеистобетонных камней гораздо эффективнее кирпичных (табл. 34). Весьма важно, что и по капиталовложениям применение стен из ячеистобетонных камней более вы-

Таблица 34

Технико-экономические показатели стен жилых зданий из силикатного кирпича и ячеистобетонных камней

Конструкция стены	Толщина в *см*	Вес в *кг/м²*	Стоимость в *руб/м²*	Капиталовложения в *руб/м²*
В два кирпича с минераловатным утеплителем	55	960	12,7	14,8
В два кирпича	51	970	11,9	12,6
В полтора кирпича с минераловатным утеплителем	43	720	10,3	13,1
Из ячеистобетонных камней, $\gamma = 700$ *кг/м³*	25	200	7,3	8,3
То же, $\gamma = 600$ *кг/м³*	25	170	6,2	6,5

годно, чем из кирпича. Существенными предпосылками для более широкого применения ячеистобетонных стеновых камней являются начатая в последнее время интенсивная разработка проектов малоэтажных зданий со стенами из этих камней, а также создание резательных машин, с помощью которых механизируется процесс формования камней и повышается их качество.

Выпускаемый в настоящее время в большом количестве теплоизоляционный ячеистый бетон даже при объемном весе 300—350 *кг/м³* менее эффективен по сравнению с панелями и камнями. По данным НИПИСиликатобетона, ячеистобетонная теплоизоляция только на 20—40 коп. дешевле фибролита и минераловатных плит марок 250—350 на битумной связке и дороже минераловатных плит марок 75—200 на синтетической связке. Еще менее эффективно применение ячеистобетонной теплоизоляции по сравнению с различными пенопластами. Поэтому, очевидно, что ячеистый бетон надо использовать там, где его применение дает наибольший эффект, а именно в стенах жилых и промышленных зданий и в покрытиях жилых зданий.

То положение, при котором в настоящее время более половины ячеистых бетонов выпускается в виде теплоизоляции, является временным. За рубежом ячеистый бетон в качестве теплоизоляции не применяется.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александровский С. В., Данилов Б. П., Багрий Э. Я., Багрий В. Я. Исследование ползучести ячеистого бетона. НТО Стройиндустрии. Киев, 1969.

2. Александровский С. В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на температурные и влажностные воздействия (с учетом ползучести). Стройиздат, 1966.

3. Алексеев С. Н., Розенталь Н. К., Лычаков В. В., Дружинин Н. Л., Стерлядьев В. А. Антикоррозионная защита арматуры в электрическом поле высокого напряжения. «Бетон и железобетон», 1969, № 10.

4. Анищенко В. В., Добрынин Е. Н., Лычаков В. В. Совершенствование технологии изготовления пространственных арматурных каркасов для стеновых панелей промышленных зданий. «Бетон и железобетон», 1970, № 9.

5. Бавс Г. Деформации ползучести армированных газобетонных балок. В кн.: «Ячеистые бетоны за рубежом». Госстрой СССР, 1961.

6. Баранов А. Т., Бахтияров К. И. Влияние основных технологических факторов на свойства ячеистого бетона. В кн.:

«Технология и заводское изготовление бетонов (тяжелых, легких и ячеистых)». НИИЖБ, Госстройиздат, 1963.
7. Бахтияров К. И., Баранов А. Т. Влияние качества пористой структуры и межпустотного материала на характер связи прочности с модулем упругости. В сб.: «Производство и применение изделий из ячеистых бетонов». НИИЖБ. Стройиздат, 1968.
8. Баранов А. Т., Макаричев В. В. Новое в технологии производства и в применении конструкций из ячеистых бетонов в СССР и за рубежом (обзор). Техническая информация ЦНИИЭТСтрома МПСМ СССР, 1971.
9. Берг О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. Госстройиздат, 1961.
10. Берг О. Я., Писанко Г. Н., Хромец Ю. Н. Исследование физического процесса разрушения бетона под действием статической и многократно повторяющейся нагрузки. В кн.: «Исследование прочности и долговечности бетона транспортных сооружений». Труды ЦНИИС, вып. 60., «Транспорт», 1966.
11. Бергстром С. и др. Подготовка стандартов по армированному ячеистому бетону в Швеции. В кн.: «Ячеистые бетоны за рубежом». Госстрой СССР, 1961.
12. Боженов П. И. Комплексное использование минерального сырья для производства строительных материалов. Госстройиздат, 1963.
13. Боженов П. И., Сатин М. С. Автоклавный пенобетон на основе отходов промышленности. Госстройиздат, 1960.
14. Бородкин В. С., Фрадкин Б. П., Белкина С. Я., Крабер Л. И. Новые проекты заводов изделий из бетонов автоклавного твердения. «Строительные материалы», 1971, № 4.
15. Бутт Ю. М., Майер А. А., Мануйлова Н. С. Взаимодействие полевых шпатов с известью в условиях автоклавной обработки. РОСНИИМС. Сб. трудов № 24, Госстройиздат, 1958.
16. Бутт Ю. М., Рашкович Л. Н. Твердение вяжущих при повышенных температурах. Стройиздат, 1965.
17. Власов О. Е., Вейденбаум Г. И. и др. Долговечность ограждающих и строительных конструкций (физические основы). Госстройиздат, 1963.
18. Волженский А. В. О зависимости структуры и свойств цементного камня от условий его образования и твердения. «Строительные материалы», 1964, № 4.
19. Волженский А. В., Буров Ю. С. Влияние автоклавной обработки на строительные свойства бетонов. В сб.: «Свойства автоклавных бетонов и изделий из них». Госстройиздат, 1958.
20. Волженский А. В., Буров Ю. С., Виноградов Б. Н., Гладких К. В. Бетоны и изделия на шлаковых и зольных цементах. Стройиздат, 1969.
21. Временная инструкция по определению призменной прочности и начального модуля упругости бетонов. Стройиздат, 1968.
22. Горяйнов К. Э. Некоторые вопросы физики гидротермального твердения ячеистых бетонов. Труды семинара «Исследование влияния режимов гидротермальной обработки на свойства силикатных материалов». Таллин, РДНТП, 1966.
23. Горяйнов К. Э. Перспективы совершенствования технологии производства ячеистых бетонов. МДНТП им. Дзержинского, 1964.
24. Горяйнов К. Э., Заседателев И. Б. Исследование

теплофизических процессов при автоклавной обработке газобетона. В кн.: «Технология теплоизоляционных материалов». НИИ по строительству. Госстройиздат, 1962.
25. ГОСТ 12 852—67. Бетон ячеистый. Методы испытаний.
26. ГОСТ 11 118—65. Панели из автоклавного ячеистого бетона для наружных стен жилых и общественных зданий. Технические требования.
27. ГОСТ 11 690—66. Панели из автоклавных ячеистых бетонов для наружных стен производственных зданий.
28. ГОСТ 7741—66. Плиты ребристые армированные из ячеистого бетона для покрытий производственных зданий.
29. ГОСТ 8829—66. Изделия сборные железобетонные. Методы испытания и оценки прочности, жесткости и трещиностойкости.
30. Григорьев Е. Г., Сатин М. С., Дерябин А. М. Жилые дома из газобетона. Стройиздат, 1962.
31. Дворядкин А. Т. Особенности производства и применения ячеистых бетонов в Швеции. «Строительные материалы», 1968, № 7.
32 Иванов И. А. Комплексное использование зол ТЭЦ для получения аглопорита и газобетона. Труды АСиА СССР. Зап.-Сиб. филиал, вып. 3, Новосибирск, 1960.
33. Клодченко В. П. и др. Исследование некоторых свойств высокопрочного газошлакосиликата и газобетона. Материалы 2-й научно-технической конференции по ячеистым бетонам. Пенза, 1965.
34. Кобринский Г. С. Анкерные узлы соединений конструкций из ячеистых бетонов. «Бетон и железобетон», 1968, № 6.
35. Коренев Ю. В. Исследование влияния повышенной влажности на прочность и деформативность изделий из газосиликата. Тезисы докладов конференции КПИ. Калинин, 1966.
36. Кржеминский С. А., Крыжановский Б. Б. Ячеистый силикатный бетон. «Строительные материалы», 1961, № 1.
37. Кривицкий М. Я. Исследование физических процессов в ячеистых бетонах при их автоклавной обработке. Труды координационного совещания «Методы исследования деформаций и кинетики нарастания прочности различных бетонов в процессе тепловой обработки». Стройиздат, 1967.
38. Кривицкий М. Я. Заводское изготовление изделий из газобетона. Госстройиздат, 1963.
39. Кудряшев И. Т., Куприянов В. П. Ячеистые бетоны. Госстройиздат, 1959.
40. Куннос Г. Я., Линденберг Б. Я. Улучшение качества газобетона. В кн.: «Исследования по бетону и железобетону» ИСИА АН Латв. ССР. Рига, 1961.
41. Левин Н. И. Механические свойства блоков из ячеистых бетонов. Госстройиздат, 1960.
42. Левин Н. И. Прочность и деформации автоклавных ячеистых бетонов при длительном сжатии. В кн.: «Ползучесть и усадка бетона». НИИЖБ Госстроя СССР, 1969.
43. Левин Н. И. Камни из ячеистых бетонов в малоэтажном строительстве. «Строительные материалы», 1967, № 7.
44. Левин Н. И. Камни из ячеистых бетонов для малоэтажного строительства. «Строительные материалы», 1968, № 7.
45. Левин С. Н., Амханицкий Г. Я., Жодзишский И. Л. Производство ячеистых бетонов в СССР (обзор). Техническая информация ЦНИИЭТСтрома МПСМ СССР, 1969.

46. Ломунов К. Ф. Новое о физических процессах при автоклавизации ячеистых бетонов. «Строительство и архитектура Ленинграда», 1965, № 8.
47. Макаричев В. В. Производство и применение ячеистых бетонов в Швеции. «Строительные материалы», 1957, № 12.
48. Макаричев В. В. Международный конгресс по легким бетонов в Швеции. «Строительные материалы», 1957, № 12.
49. Макаричев В. В., Левин Н. И. Расчет конструкций из ячеистых бетонов. Госстройиздат, 1961.
50. Макаричев В. В., Рекитар Я. А., Эвинг П. В. Производство и применение мелких автоклавных стеновых блоков. «Строительные материалы», 1967, № 7.
51. Макаричев В. В., Трамбовецкий В. П. К вопросу о прочности ячеистого бетона. В кн.: «Ячеистый бетон», вып. 1, 1968.
52. Марголин А. Г., Раков М. В. Крупнопанельные стеновые ограждающие конструкции промышленных зданий. Стройиздат, 1969.
53. Миронов С. А. Некоторые обобщения по теории и технологии ускорения твердения бетона. Рилем, Стройиздат, 1968.
54. Миронов С. А., Кривицкий М. Я., Малинина Л. А., Малинский Е. Н., Счастный А. Н. Бетоны автоклавного твердения. Стройиздат, 1968.
55. МРТУ 7-20-69 «Камни стеновые из ячеистых бетонов». Стройиздат, 1970.
56. Нерепст П. Газобетон как материал для наружных стен. Доклад на II Международном конгрессе по бетону. «Бюллетень строительной техники», 1959, № 3.
57. Новиков Б. А. Производство и применение крупноразмерных армированных деталей из газозолосиликата. БТИ НИИОМТП. Госстройиздат, 1962.
58. Новиков Б. А., Левин Н. И., Масленникова Г. П. Производство газозолосиликата на Ступинском заводе ячеистых бетонов. Труды НИИЖБ, вып. 32, Госстройиздат, 1963.
59. Оямаа Э. Г. Строительные детали из сланцезольных автоклавных бетонов. Стройиздат, 1969.
60. Оямаа Э. Г., Кивисельг Ф. П. Опыт производства и применения сланцезольного газобетона. Материалы Второй научно-технической конференции по вопросам химии и технологии ячеистых бетонов в г. Пензе. Саратов, 1965.
61. Пинскер В. А. Некоторые вопросы физики ячеистого бетона. В кн.: «Жилые дома из ячеистого бетона». Госстройиздат, 1963.
62. Пинскер В. А. Расчет модуля упругости ячеистого бетона. В кн.: «Проектирование конструкций из ячеистых бетонов». ЛДНТП, 1966.
63. Прусис А. Р., Аверченко В. Е. Внедрение виброрезательной технологии газобетонных изделий. «Строительные материалы», 1970, № 7.
64. Пуринс Э. Модуль упругости ячеистого бетона. В кн.: «Ячеистые бетоны за рубежом». Госстрой СССР, 1961.
65. Раинамяги Л. А. О деформативности силикатного бетона при длительном загружении. Сб. трудов НИПИСиликатобетона № 1. Таллин, 1967.
66. Ребиндер П. А., Ямпольский Б. Я. Исследование структурно-механических свойств дисперсных систем методом конического пластометра. «Коллоидный журнал», т. 10, вып. 6, 1948.
67. Рекитар Я. А., Вигранская Н. О. и др. Резервы повышения экономической эффективности производства и применения в строительстве конструкций из легких бетонов. VI конференция по бетону и железобетону. Стройиздат, 1966.
68. Розенфельд Л. М. Использование непрокаленной алюминиевой пудры в производстве газобетона. «Бетон и железобетон», 1960, № 12.
69. Розенфельд Л. М., Нейман А. Г. Автоклавный бесцементный газошлакобетон. Стройиздат, 1968.
70. Руднаи Д. «Легкий бетон». Стройиздат, 1964.
71. Селл Р. К вопросу о длительной прочности автоклавного газобетона. В кн.: «Ячеистые бетоны за рубежом». Госстрой СССР, 1961.
72. Силаенков Е. С., Тихомиров Г. В. Влияние состава цемента на деформации ячеистых бетонов в эксплуатационных условиях. В сб.: «Повышение долговечности панелей из ячеистых бетонов». Стройиздат, 1965.
73. Скатынский В. И., Крумелис Ю. В. К выбору теории ползучести для описания длительного деформирования ячеистых силикатных бетонов. НТО стройиндустрии. Киев, 1969.
74. Саталкин А. В., Комохов П. Г. Высокопрочные автоклавные материалы на основе известково-кремнеземистых вяжущих. Стройиздат, 1966.
75. Теслер П. А. и Кобринский Г. С. Клееные ячеисто бетонные панели для жилых зданий и узлы их соединения. ЦБТИ ЦНИИОМТП Госстроя СССР. Стройиздат, 1966.
76. Тетерс Г. А. Прочность и жесткость сжато-изогнутых армированных газобетонных элементов. ТПИ. Таллин, 1960.
77. Указания по проектированию конструкций из ячеистых бетонов (СН 287-65). Стройиздат, 1965.
78. Шейкин А. Е. Строительные материалы. Стройиздат, 1968.
79. Энгволл А. Огнестойкость изделий из сипорекса. В сб.: «Ячеистые бетоны за рубежом». Госстрой СССР, 1961.
80. Beres L. Shrinkage and creep of cellular concrete, «Concrete Building and Concrete Products», Sept., 1968.
81. Bessey G. and Dilnot S. The relation between strength and free water content of aerated concretes, «Mag. of Concrete Research», № 3, 1949, London.
82. Valore R. Cellular concretes, «Journal of the American Concrete Institute», v. 25, № 9, 1954.
83. Gázszilikát termékek és épületszerkezetek «Dokumentacio» № 5185, Budapest, 1965.
84. Hamák L., Kratochvila A. Pórovitý betón, Bratislava, 1965.
85. Graf O. Gasbeton-Schaumbeton-Leichkalkbeton, Stutgart, 1949.
86. Graf O., Schäffler H. Versuche zur Prüfung der Grösse des Schwindens und des Quellens von Gas und Schaumbeton, «Deutcher Ausschuss für Stahlbeton», № 121, 1956.

87. K r u m l F. Schwinden und Kriechen von Leichtbetonen, «Baustoffindustrie», Berlin, DDR, № 11, 1964.
88. Lättbetonghandboken, Siporex, Itong, Stockholm, 1968.
89. L e w i c k i B. Betony lekkie, Budownictwo betonowe, т. IV, Warszawa, 1967.
90. P u r i n s E. Elastizitätsmodul, Zug-und Druckfestigkeit des Gasbetons in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt des Materials. Chalmers tekniska Högskola.
91. Reinsdorf. Leichtbeton, Band 11, Berlin, 1963.
92. S h o r t A., K i n n i b u r g W. Lightweight Concrete, London, 1962.
93. Schäffler H. Elastizität und Prismendruckfestigkeit von Leichbeton, im besonderen von Gas und Schaumbeton, «Betonsteinzeitung», Wiesb, 20, 1954.

ОГЛАВЛЕНИЕ